

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

# Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Charakterisierung von zementgebundenen Werkstoffen mit Selbstheilungseigenschaften

Fabian Malm

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität  
München zur Erlangung des akademischen Grades einer

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Christian U. Große

2. Prof. dr. ir. Erik Schlangen

3. Prof. Dr. Torben Gädt

Die Dissertation wurde am 28.10.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und  
durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 09.06.2021 angenommen.



# Kurzfassung

Um die Effizienz selbstheilender Eigenschaften eines zementgebundenen Werkstoffes zuverlässig zu evaluieren, werden Mess- und Testverfahren validiert, welche den Prüfkörper dauerhaft und kontinuierlich über die volle Versuchsdauer zerstörungsfrei überwachen sollen. Dazu zählen u. a. Ultraschall, Schwingungsanalyse und Schallemissionsanalyse. Hergestellte Testserien vom Labormaßstab bis hin zu strukturellen Bauteilelementen mit verschiedenen Selbstheilungskonzepten werden dabei systematisch mit analytischen und eigens entwickelten Versuchsaufbauten untersucht.

## Abstract

In order to reliably evaluate the self-healing efficiency of cementitious materials, test and monitoring techniques are being validated. Therefore, test specimens are permanently and continuously monitored over the full test duration in a non-destructive manner. These methods include i. a. ultrasound, vibration analysis and acoustic emission analysis. Test series ranging from a lab scale to structural component elements with different self-healing concepts have been systematically examined with analytical and self-developed test setups.

More detailed information is provided in the English summary in Appendix E.



# Inhalt

1	Einleitung .....	1
2	Selbtheilungskonzepte zementgebundener Werkstoffe .....	3
2.1	Autogene Heilung .....	4
2.2	Hydrogele .....	5
2.3	Bakterienbasierte Heilung .....	7
2.4	Polyurethanbasierte Heilung .....	11
3	Grundlagen elastischer Wellenausbreitung in Festkörpern .....	15
3.1	Elastische Konstanten .....	16
3.2	Wellengleichung .....	18
3.3	Physikalische Grundlagen und Wechselwirkungen .....	21
4	Zerstörungsfreie Prüfverfahren .....	25
4.1	Ultraschallverfahren .....	26
4.1.1	ToF-Verfahren .....	29
4.1.2	ToFD- Verfahren .....	30
4.1.3	In-situ-Messung: Monitoring der Rissbildung und autonomen Heilung .....	35
4.2	Schallemissionsanalyse .....	37
4.2.1	Geiger-Methode .....	40
4.2.2	Bancroft-Methode .....	42
4.3	Schwingungsanalyse .....	44
4.4	Sensortechnik und –typen .....	48
5	Mikro-Ebene: Mörteltestkörper .....	57
5.1	Versuchsdurchführung und betontechnologische Eigenschaften .....	58
5.2	Ultraschall .....	72
5.2.1	Ersteinsatzzeit .....	74
5.2.2	Centroid Time/Centroid Frequency .....	77

5.2.3	In-situ-Monitoring.....	82
5.3	Schwingungsanalyse .....	84
6	Meso-Ebene: Betontestkörper .....	91
6.1	Betontestkörper mit MEYCO.....	93
6.1.1	Versuchsdurchführung .....	94
6.1.2	Ultraschall: ToFD.....	98
6.1.3	Ultraschall: In situ .....	102
6.1.4	Schwingungsanalyse .....	103
6.1.5	Schallemissionsanalyse .....	106
6.2	Betontestkörper mit SLV .....	112
6.2.1	Versuchsdurchführung .....	112
6.2.2	Ultraschall: ToFD.....	116
6.2.3	Ultraschall: In situ .....	119
6.2.4	Schwingungsanalyse .....	121
6.2.5	Schallemissionsanalyse .....	123
7	Makro-Ebene: Bauteile .....	131
7.1	Betonbalken.....	132
7.1.1	Betontechnologische Untersuchungen .....	134
7.1.2	Ultraschallmessungen.....	137
7.2	Betonplatten .....	141
7.2.1	Betontechnologische Untersuchungen .....	145
7.2.2	Ultraschall- und Oberflächenwellenmessungen .....	147
8	Bewertung der Verfahren und Prüftechniken.....	155
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	165
	Referenzen.....	169
	Appendix .....	189

# 1 Einleitung

Beton ist der weltweit am häufigsten verwendete Baustoff. Mit dem stetigen Bedarf an Wohnraum und einer verbesserten Infrastruktur gewinnt die Nachfrage an nachhaltigen und dauerhaften Betonbauwerken immer mehr an Bedeutung. Eines der Kernelemente ist dabei die Beurteilung und Prävention vor Schädigungen, welche die Lebensdauer reduzieren und die Sicherheit des Bauwerks gefährden (Abbildung 1-1). Deswegen ist es notwendig, Betonbauwerke in regelmäßigen Abständen zu prüfen und ihre Funktionstüchtigkeit zu beurteilen. Dabei reichen die Prüfungen von vollständig zerstörungsfrei, zu minimal-invasiven, bei denen z. B. nur die Oberfläche leicht beschädigt wird, bis hin zu teilzerstörenden Tests wie z. B. dem Entnehmen von Bohrkernen und Ausziehversuche [Gupta 2018a].



Abbildung 1-1: Degradationsprozess von Betontragwerken.

Das Hauptziel der zerstörungsfreien Methoden ist es, zuverlässige und geeignete Prüf- und Überwachungstechniken zu ermöglichen, um Eigenschaften wie Festigkeit und E-Modul, aber auch sichtbare und unsichtbare Defekte in Strukturelementen zu detektieren. Insbesondere bei Beton werden derzeit zerstörungsfreie Prüfmethode (ZfP) zur Bestimmung der Abmessungen von Elementen, zur Beurteilung der Risstiefe oder zur Bestimmung der Lage der Bewehrung entwickelt. Eine der relevantesten Schwachstellen von Stahlbeton ist die Bildung von Mikrorissen. In Abhängigkeit von Betonart und Expositionsklasse sind für Stahlbetonkonstruktionen Mikrorisse mit maximalen Rissweiten von 0,2 mm bis 0,4 mm erlaubt [DIN EN 1992-1-1:2011-01]. Diese Risse beeinträchtigen zwar die Standsicherheit nicht, mindern aber die Gas- und Flüssigkeitsdichtheit. Dies ist beispielsweise ein großes Problem in Tunneln und großen unterirdischen Bauwerken [Yang et al. 2018], wo neben belastungsabhängigen Beanspruchungen bereits Hydratationsreaktionen und Temperatur-/Schwindeffekte der großen Betonsegmente zur Bildung von frühzeitigen Mikrorissen führen können [Edwards 2015]. Da hier die Flüssigkeitsdichtheit notwendig ist, sind meist direkt nach der Fertigung

zusätzliche abdichtende (Reparatur-)Maßnahmen erforderlich, welche aufwendig und teuer sind. Darüber hinaus fördern Risse, auch wenn sie nicht durchgehend sind, ein beschleunigtes Eindringen von aggressiven Flüssigkeiten und Gasen, die heutzutage im städtischen Umfeld verstärkt vorkommen (z. B. Chloride, gesteigerte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen). Ein erhöhtes Risiko einer Bewehrungskorrosion und eine Minderung der Dauerhaftigkeit ist die Folge. Auch dies erfordert für eine Aufrechterhaltung der Sicherheit und Lebensdauer der Bauwerke eine regelmäßige Inspektion, Wartung und Instandsetzung. Diese Praktiken sind mit hohen direkten und indirekten Kosten, wie z.B. wirtschaftlichen Verlusten durch Staus, verbunden. Außerdem sind nicht alle Bauwerke für Inspektion und Reparatur leicht zugänglich.

Inspiziert von der Natur, wurden in den letzten Jahren innovative selbstheilende Materialien mit entsprechenden Anwendungskonzepten entwickelt, die den menschlichen Eingriff in die Reparatur- und Ertüchtigungsprozesse minimieren sollen. Dieses Konzept setzt generell voraus, dass die notwendigen Heilmittel bereits im Werkstoff integriert sind. Nach grundlegenden Forschungen müssen die Selbstheilungsmechanismen nun für den weiteren Entwicklungsfortschritt in der praktischen Anwendung integriert und umfassend evaluiert werden. Mit dem Ziel, die natürliche Rissverschließung bzw. Rissabdichtung gegen Umwelt- und mechanische Einwirkungen zu verbessern, wurden im Rahmen des von der Europäischen Kommission geförderten internationalen Forschungsprojektes HealCON<sup>1</sup> Materialkomponenten wie superabsorbierende Polymere (SAPs), Bakterien und verkapselte Polyurethane für die praktische Anwendung optimiert und untersucht (Kapitel 2). Während die Evaluierung der Selbstheilungseffizienz bzw. der betontechnologischen Eigenschaften anfänglich von Wissenschaftlern vorwiegend zerstörend über die Wiedererlangung von Druck-, Zug- oder Biegefestigkeit erfolgte, gewinnen zerstörungsfreie Prüfverfahren immer mehr an Bedeutung. Entscheidender Vorteil der Versuchsdurchführungen mit ZfP-Methoden ist der strukturelle Erhalt der zu untersuchenden Testkörper über die gesamte Versuchsdauer und der Ermöglichung weiterführender Experimente (Kapitel 4). Da die Entwicklung eines neuen Materials typischerweise im Labormaßstab beginnt und mit einer Demonstration der Techniken an realen Konstruktionen endet, sind unterschiedliche ZfP-Ansätze notwendig. Dazu gehören z. B. Ultraschall, Schwingungs- bzw. Resonanzfrequenzmessungen und die Schallemissionsanalyse. Basierend auf vielversprechenden Studien u. a. von Granger et al. (2007), Granger et al. (2009) und Van Tittelboom et al. (2012) galt es im Rahmen dieser Arbeit ein zerstörungsfreies Messkonzept zu entwickeln, welches mit angepassten und kombinierten ZfP-Verfahren die Charakterisierung und Beurteilung der zur Verfügung stehenden Heilmittel hinsichtlich ihrer Heilungseffizienz als auch ihrer systembeeinflussenden Materialeigenschaften vorantreibt. Mörtelprismen, kleine Betonbalken sowie strukturelle Bauelemente (große Betonbalken und -Platten) dienten dabei als Testkörper.

Einige der hier vorgestellten Erkenntnisse und Forschungsergebnisse entstanden im Rahmen des geförderten HealCON-Projektes. Versuchsdurchführungen, Experimente und Testkörper wurden daher teilweise in Kooperation mit den beteiligten Forschungspartnern konzipiert und hergestellt.

---

<sup>1</sup> HealCON – “Self-healing materials for prolonged lifetime”, EU 7th Framework Program (FP7/2007–2013)

## 2 Selbstheilungskonzepte zementgebundener Werkstoffe

Besitzt ein Körper die Fähigkeit seine Verletzungen bzw. Schädigungen akut eigenständig, ohne den Einsatz fremder und außenstehender Hilfsmittel, zu überwinden, kann von einer autogenen Selbstheilung gesprochen werden. Kommen für eine Rissverschließung zusätzliche Heilmittel zum Einsatz, welche aktiv selbstständig den Riss von innen verschließen, wird von einer autonomen Selbstheilung gesprochen. Dabei kann unter der Definition „Heilung“ sowohl eine Rissabdichtung als auch eine Wiederherstellung der initialen Materialeigenschaften (z. B. Festigkeit) verstanden werden. Grundvoraussetzung für eine autogene bzw. autonome Rissverschließung jedoch ist, dass der Werkstoff oder das Bauteil diese selbstheilende Eigenschaft von Beginn an innehält.

Um das entsprechend notwendige Konzept der Selbstheilung bei zementgebundenen Werkstoffen anwenden zu können, müssen zunächst die zu erwartenden Versagensmechanismen verstanden bzw. die entsprechenden Anforderungen an die Heilungsmechanismen geklärt sein. Dabei lassen sich die Rissbildungen in Abhängigkeit des Betonalters in zwei Hauptgruppen kategorisieren. Plastischer Beton ist überwiegend anfällig für frühzeitige Setzungs- und Trocknungsschwindrisse, während ausgehärteter Beton durch Trocknungsschwinden, thermische Spannungen, chemische Reaktionen, Verwitterung, Korrosion, Überbelastung oder Fehlplanungen geschädigt wird. In Abhängigkeit der Belastung des Betons können sich diese Schadensvorgänge von sehr kurzen, spontanen Reaktionen bis hin zu sehr langsamen Prozessabläufen über einen großen Zeitraum ausweiten. Gleichzeitig lassen sich diese Zeiträume für den Heilungsprozess nutzen. Allerdings bedarf es dafür eines Auslöse- bzw. Triggermechanismus, der einerseits die Fähigkeit besitzt, auf lokale Schädigungen spontan zu reagieren und zugleich auch an die Dauer des notwendigen Schädigungsprozesses angepasst ist. Kommt es schließlich zu einer Aktivierung des Triggers, muss an der notwendigen Stelle der Heilungsprozess gestartet werden. Ob dabei das Heilmittel, welches dem Schaden entgegenwirken soll, bereits an gegebener Stelle vorhanden ist oder erst zur Schadensstelle transportiert werden muss, hängt vom Selbstheilungskonzept ab. Ist mit einer wiederkehrenden Schädigung an gleicher Stelle zu rechnen, muss dies bei der Wahl des entsprechenden Heilungskonzeptes berücksichtigt werden.

Die bei der Bauteilherstellung eingebrachten selbstheilenden Materialien, welche sowohl organischen als auch anorganischen Ursprungs sein können, müssen neben den Beanspruchungsszenarien auch an die äußeren Randbedingungen angepasst sein. Dazu zählen u. a. das stark alkalische Milieu im

Beton (pH-Wert  $\approx 13$ ), sowie die Temperatur und Feuchtigkeit. Zudem sollten sie den Kräften standhalten, welche beim Mischvorgang der Betonherstellung entstehen und die Eigenschaften vom Frisch- und Festbeton nicht negativ beeinflussen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bedarf es in den meisten Fällen einer Verkapselung der Heilmittel. Einen Überblick zu verschiedensten Verkapselungstechniken für bereits untersuchte autonome Heilmittel gibt u. a. Gupta et al. (2016).

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit relevanten Heilungs- und Verkapselungstechniken aufgezeigt.

## 2.1 Autogene Heilung

Dass zementgebundene Werkstoffe unter gewissen Voraussetzungen ihre Funktionseigenschaften autogen wiedererlangen können, wurde bereits zahlreich nachgewiesen [Dry 1994, Edvardsen 1999, Reinhardt et al. 2003, Yang et al. 2009]. Zu diesen Selbstheilungsphänomenen zählen u. a. die Selbstabdichtung von Mikrorissen als Schutz gegen eindringende Fluide und Gase oder teilweise auch die Wiedererlangung von aufnehmbaren Belastungskräften. Die Hauptursache für die Selbstversiegelung von Mikrorissen bzw. der Nachverfestigung kann auf physikalische, chemische und mechanische Gründe zurückgeführt werden [De Rooij et al. 2013]. Innerhalb des chemischen Prozesses ist die kontinuierliche Hydratation von Klinkermineralien oder die Carbonatisierungsreaktion von Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) mit Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) zu Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ab dem Zeitpunkt der Frischbetonherstellung am stärksten ausgeprägt (Abbildung 2-1). Es ist schließlich das Resultat einer Reaktion zwischen nicht-hydratisierten Zementpartikeln und in Wasser gelöstem Kohlendioxid [Huang et al. 2014]. Besonders bei Betonen mit einem niedrigen w/z-Wert kann die Menge an nicht-hydratisiertem Zement bis zu 25 % betragen. Daher muss für eine effektive Rissverschließung Wasser vorhanden sein, was sich nur schwer kontrollieren lässt und schließlich die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit stark einschränkt. Daneben ist diese Art der autogenen Selbstheilung auf eine sehr geringe Rissweite limitiert, welche in der Praxis meist schnell überschritten wird. Die maximale Rissbreite, die durch den natürlichen Heilungsprozess noch verschlossen werden kann, ist reicht in den individuellen Studien verschiedener Forscher von 5  $\mu\text{m}$  bis 300  $\mu\text{m}$  [Van Tittelboom et al. 2013]. Auch wenn die Rissweiten meist sehr gering bleiben und die Festigkeitseigenschaften der Strukturen nicht beeinflusst werden, tragen sie zur Materialporosität und Permeabilität bei. Das Eindringen von aggressiven Chemikalien wie Chloriden, Sulfaten und Säuren kann langfristig zu einer Zersetzung der Betonmatrix und einer vorzeitigen Korrosion der eingebetteten Stahlbewehrung führen. Dies wird die Lebensdauer der Konstruktionen langfristig beeinträchtigen. Des Weiteren ist noch die mechanische Komponente der autogenen Heilung zu erwähnen. Diese spielt innerhalb der Selbstheilungseffizienz nur eine untergeordnete Rolle, beeinträchtigt aber maßgeblich deren Evaluierung mit zerstörungsfreien Prüfmethoden (z. B. Ultraschallverfahren). Dazu zählen feine Partikel und Gesteinskörner im Wasser, welche in die Risse eindringen und sich mit kleinen Bruchstücken an den Rissflanken des Betonkörpers verkanten; allerdings führt dies nicht zu einer Wiederherstellung der Festigkeit.

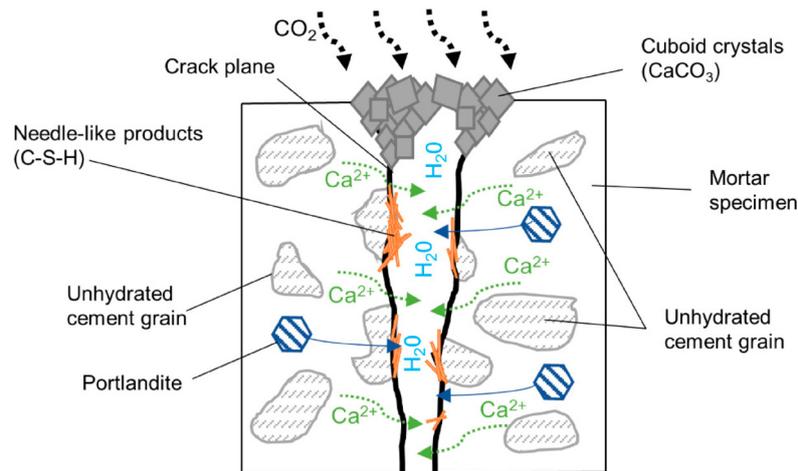


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer autogenen Selbstheilung zwischen zwei Rissflanken [Rajczakowska et al. 2019].

In der Literatur wird unter der Definition der autogenen Selbstheilung ebenfalls die Hinzugabe von mineralischen Zusatzstoffen und Zementersatzstoffen wie z. B. Calcium Sulfoaluminat und Natrium Monofluorophosphate [Sisomphon et al. 2011, Sisomphon et al. 2012] verstanden. Diese ermöglichen, aufgrund der Bildung von zusätzlichen kristallinen Strukturen, eine verstärkte Rissverschließung von Rissweiten von bis zu 400  $\mu\text{m}$  bzw. sie ermöglichen bereits im Vorfeld eine Reduzierung von sich bildenden Mikrorissen.

Die autogene Heilung ist auch bei zusätzlich implementierten verstärkt autogenen oder autonomen Selbstheilungsmechanismen, welche von einer Hinzugabe von Wasser oder Feuchtigkeit profitieren bzw. diese zwangsweise benötigen, immer omnipräsent. Eine eindeutige Differenzierung zwischen parallel ablaufenden Selbstheilungskonzepten ist deshalb oft schwierig und bedarf meist einer umfangreichen und detaillierten Untersuchung.

## 2.2 Hydrogele

Superabsorbierende Polymere (SAPs) oder Hydrogele sind dreidimensionale, vernetzte Polymerverbindungen, die nicht löslich sind, aber große Mengen an Wasser aufnehmen können (Abbildung 2-2, links). Dabei binden sie das Wasser und bilden ein weiches unlösliches Gel. Ihre Quellfähigkeit ist stark von der Alkalität und der Ionenkonzentration der Lösung abhängig, sodass die SAP-Partikel beim Einmischen in Frischbeton meist eine geringere Quellung aufweisen [Pelto et al. 2017]. Nach der Zementhydratation geben die Hydrogele das aufgenommene Anmachwasser wieder frei und schrumpfen auf ihre Anfangsgröße. Dabei hinterlassen sie Makroporen in der Betonmatrix. Bildet sich ein Riss, kann Feuchtigkeit in das Material eindringen, und die SAPs schwellen wieder an. Zur Rissflanke freiliegende SAPs können im Idealfall nun aufgrund des zusätzlich entstandenen Volumens und des pH-reduzierten Quellwassers sich über das Porenvolumen hinaus ausweiten, den Riss schließlich physikalisch blockieren und eine weiterführende Permeabilität unterbinden (Abbildung 2-2, rechts). Des Weiteren dienen die SAP-Partikel als lokaler Wasserspeicher und stimulieren während der Desorption den autogenen Heileffekt (Kapitel 2.1). Die Dauer der Rissverschließung kann meist nicht

vorhergesagt werden, da dies ebenfalls von den Einwirkungen und Umgebungsbedingungen während der Heilungsphase abhängt. Aufgrund der aktiven Unterstützung der natürlichen autogenen Selbstheilung (Kapitel 2.1) wird bei der Verwendung von Hydrogelen auch von einer verstärkten autogenen Selbstheilung gesprochen. Während die reine autogene Heilung auf die frei verfügbaren Ausgangsstoffe stark limitiert ist, lässt sich der Quellmechanismus der Hydrogele im Idealfall vielfach wiederholen.

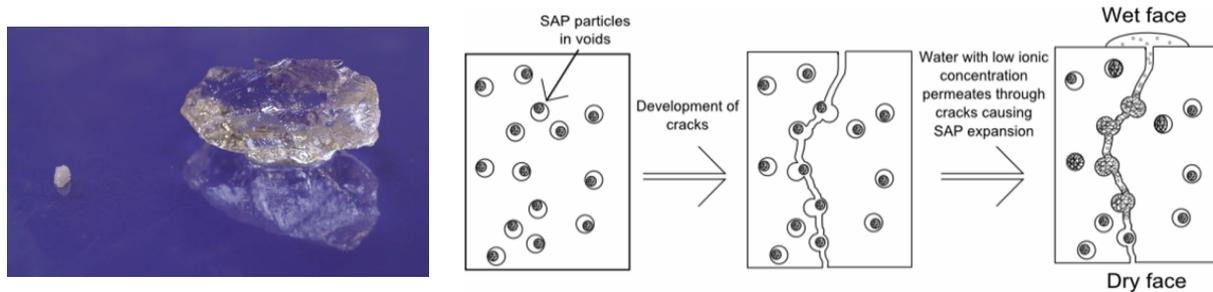


Abbildung 2-2: links: Exemplanische Darstellung eines SAP-Partikels im trockenen Zustand und nach vollständiger Wasserabsorption [Snoeck 2016]. Rechts: Schematische Darstellung des physikalischen Rissverschließungskonzepts nach Rissinitiierung innerhalb eines zementgebundenen Werkstoffes [Lee et al. 2010].

Weiterführend gibt es einige Nachteile bei der Verwendung von SAPs in zementgebundenen Werkstoffen. Auch wenn die Wasserabsorption während der Frischbetonherstellung geringer ist als bei pH-neutralem Wasser, werden die rheologischen und materialspezifischen Parameter selbst von kleinsten Partikelmengen unbehandelter Hydrogelgranulate stark beeinflusst [Dang et al. 2017, Filho et al. 2012, Klemm et al. 2013, Lee et al. 2010, Olawuyi et al. 2014, Olawuyi et al. 2013, Schröfl et al. 2012, Snoeck et al. 2019, Snoeck et al. 2014]. Daher wird ein hoher Aufwand betrieben, die Polymere im Vorfeld gegen eine vorzeitige Wasseraufnahme zu modifizieren und zu verkapseln. Voraussetzung jedoch ist, dass die Modifikation bzw. die Kapselschale einerseits eine homogene Vermischung der SAP-Partikel in der wasserhaltigen Frischbetonmischung ermöglicht und andererseits ein ausreichendes Adhäsionsvermögen an der Zementmatrix gewährleistet. Darüber hinaus sollte das Hüllmaterial den mechanischen Belastungen beim Mischen standhalten, aber zerbrechlich genug sein, wenn ein Riss die SAP-Partikel passiert [Alghamri et al. 2016, Dong et al. 2016, Kanellopoulos et al. 2016, Kanellopoulos et al. 2017, Lee et al. 2014, Mostavi et al. 2015].

## SAP

Da die Verkapselungstechniken meist noch sehr aufwendig und teuer sind, wurde in dieser Arbeit zunächst das kommerziell erhältliche SAP FLOSET 27 CC (SNF FLOERGER) ohne zusätzliche Verkapselung bzw. Modifikation eingesetzt. Dass sich dieses Polymer für eine erfolgreiche und zuverlässige wasserdichte Rissverschließung bei Mörtelprismen mit ca. 150 µm Rissweite eignet, konnten bereits Pelto et al. (2017) und Gruyaert et al. (2016c) mit Wasserpermeabilitätstests nachweisen.

### SAP G

Weiterführend wurden modifizierte superabsorbierende Polymere (SAP G) von der Firma Ceinmat (Spanien) in großskalige Betontestkörper (Kapitel 7.2) eingebracht und untersucht. Die pH-Empfindlichkeit dieses neu entwickelten Hydrogelgranulats (SAP G) wurde gegenüber kommerziell erhältlichen Produkten durch eine Anreicherung der Polymerskelette mit zusätzlichen hydrophilen ionischen Carbonsäurefunktionalitäten erhöht. Damit weisen diese organisch basierten Polymere ein höheres Schwellvermögen sowie eine schnellere Reaktionskinetik auf, welches das Potential einer effektiveren Selbstheilung erhöht.

## **2.3 Bakterienbasierte Heilung**

Die Anwendung von Bakterien für die Herstellung von nachhaltigen und dauerhaften zementgebundenen Werkstoffen wurde maßgeblich von Jonkers (2007) initiiert. Dabei werden alkaliresistente Bakteriensporen, welche selbst innerhalb eines stark basischen Milieus eine hohe Lebenserwartung aufweisen, der Betonmischung hinzugegeben. Basierend auf den jeweilig individuellen metabolischen Stoffwechselfvorgängen gibt es zahlreiche Bakteriengattungen, die unter Wasserzugabe eine  $\text{CaCO}_3$ -produzierende Eigenschaft aufweisen und auch bereits auf deren Selbstheilungseigenschaften in zementgebundenen Werkstoffen untersucht wurden [De Muynck et al. 2008, Jonkers et al. 2010, Sierra-Beltran et al. 2014, Son et al. 2018, Tziviloglou et al. 2016b, Vijay et al. 2017, Wiktor et al. 2011, Xu et al. 2018]. Neben der Verkapselungstechnik ist die Wahl des geeigneten Bakterienstammes das Schlüsselkriterium für eine erfolgreiche Selbstheilung. Dabei bildet die „Ausscheidung“ von Calciumcarbonat eher eine überwiegende rissabdichtende Wirkung als eine Rückgewinnung mechanischer Eigenschaften. Um die autonome Selbstheilungseffizienz gegenüber der (allgegenwärtigen) autogenen Heilung zu evaluieren, werden in den meisten Studien Rissweiten von 200-500  $\mu\text{m}$  angestrebt. Eine Zusammenfassung über zahlreiche Ergebnisse mit verschiedensten Bakterienarten und Versuchsaufbauten geben Gupta et al. (2017) und Vijay et al. (2017). Jedoch existieren neben den bereits bekannten Einflussfaktoren auch noch viele weitere Randeinflüsse, welche dieses komplexe Zusammenspiel stark beeinflussen. Daher ist eine Vorhersage über die meist mehrwöchige Dauer einer Rissverschließung sehr schwierig.

In dieser Arbeit wird auf die Anwendung von axenisch<sup>2</sup>-kultivierten Bakterien der Gattung *Bacillus* sowie einer nicht-axenischen Mischkultur von ureolytischen Bakteriensporen Bezug genommen. Wie sich diese Kultivierungen hinsichtlich ihres Kosten-Nutzen-Faktors unterscheiden, erläutert u. a. Silva et al. (2015). Die notwendigen Ausgangsstoffe für die in dieser Arbeit untersuchten Mörtel- und Betontestkörper wurden von der TU Delft (Niederlande), Avecom N.V. (Belgien) sowie aus einer Kooperation der Firmen VTT (Finnland) und Devan Chemicals N.V. (Belgien) im Rahmen des EU-Forschungsprojektes HealCon zur Verfügung gestellt.

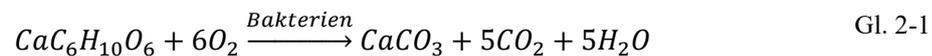
---

<sup>2</sup> axenisch: keimfrei, ohne Verunreinigung

### Reinkulturen (BAC/ME)

Um die axenisch-kultivierten Sporen gegen den Herstellungsprozess und weitere äußere Einflüsse zu schützen und zu immobilisieren, können diese einerseits z. B. mit Hilfe von porösen Blähtonkugeln (u. a. Liapor, 1/4 mm, Liapor GmbH Germany) [Han et al. 2019, Jonkers 2011, Tziviloglou et al. 2017a] oder mittels spezifischer Extrusions-, Sprühtrocknungs- oder Gefriertrocknungstechniken verkapselt werden [Pungrasmi et al. 2019].

Blähtonkugeln dienen bereits in der Bauindustrie als Leichtzuschlag für die Herstellung von Leichtbeton und besitzen die notwendige Druckfestigkeit, um den Betonherstellungsprozess ungeschadet zu überstehen. Der große Porenraum sowie der kostengünstige Materialpreis sind geeignete Faktoren für eine effiziente und massentaugliche Produktion von bakterienbasierten Heilmitteln. Um eine  $\text{CaCO}_3$ -verstärkende Selbstheilung zu erlangen, werden neben den Bakteriensporen (eingelagert in Zeolith-Pulver) zusätzliche Nährstoffe wie Calciumlaktat ( $\text{CaC}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$ ) und Hefeextrakt mit in die zur imprägnierende Suspension gegeben:



Durch die Laktatzugabe wird unter zusätzlich vorhandenen Sauerstoffmolekülen (z. B. in Wasser) dieser Prozess (Gl. 2-1) verstärkt, was zu einer Ausfällung wesentlich höherer Mengen an Calciumcarbonat führt (Abbildung 2-3). Neben der äquimolaren Umwandlung entsteht weiteres Carbonat, auch indirekt durch die chemische Reaktion von metabolisch erzeugtem  $\text{CO}_2$ . Da letzteres an der Oberfläche des Rissinneren erzeugt wird, kann es direkt mit den noch im Rissinneren vorhandenen Portlanditpartikeln (vgl. Abbildung 2-1) reagieren [Jonkers 2011].

Via Vakuumverfahren lässt sich die Suspension schließlich in die Kugeln einbringen. Dass sich diese Verkapselungstechnik während des Schädigungsprozesses als geeigneter Trigger mit anschließender Aktivierung der Heilungsphase erwiesen hat, wurde numerisch wie auch mit Analyseverfahren u. a. von Tziviloglou et al. (2015) und Zemskov et al. (2011) belegt. Neben den zu berücksichtigenden Veränderungen auf die Frischbetonverarbeitbarkeit sowie erhärteten Materialeigenschaften hat sich im Vergleich zu naturbelassenen Blähtonkugeln gezeigt, dass die Betondruckfestigkeit mit imprägnierten Tonkugeln nochmals reduziert wird [Tziviloglou et al. 2016a]. Diese Charakteristik scheint hauptsächlich durch die Hinzugabe von Hefeextrakt beeinflusst zu sein [Schreiberová et al. 2019]. Neben der Freisetzung von gewissen Mengen der Heilmittelsuspension während des Anmischens wird dieser Effekt durch Suspensionsrückstände an der Außenschale der Blähtonkugeln verstärkt (Abbildung 2-4, links). Dass sich der Imprägnierungsprozess hinsichtlich der Überprüfung der Bakterienaktivität mittels Sauerstoffkonzentrations- bzw. Verbrauchsmessungen nach Tziviloglou et al. (2015) optimieren lässt, wird von Mayer (2016) gezeigt.

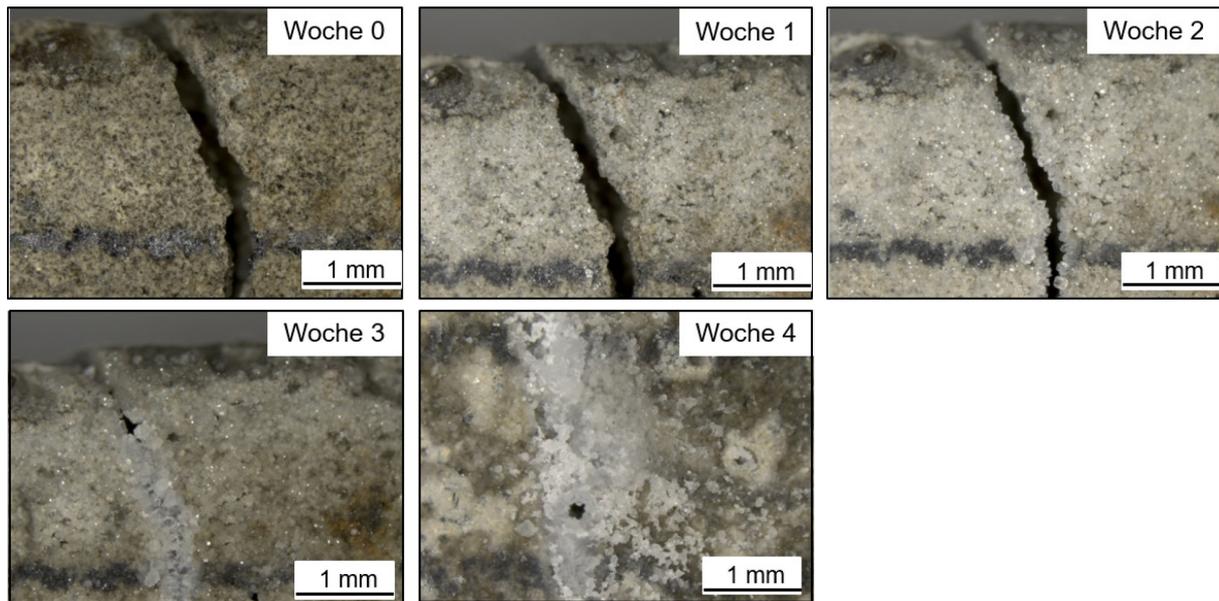


Abbildung 2-3: Beispielhafte Darstellung einer zeitabhängigen bakterienbasierten Rissverschließung aufgrund von Calciumcarbonatablagerungen [Wang et al. 2014].

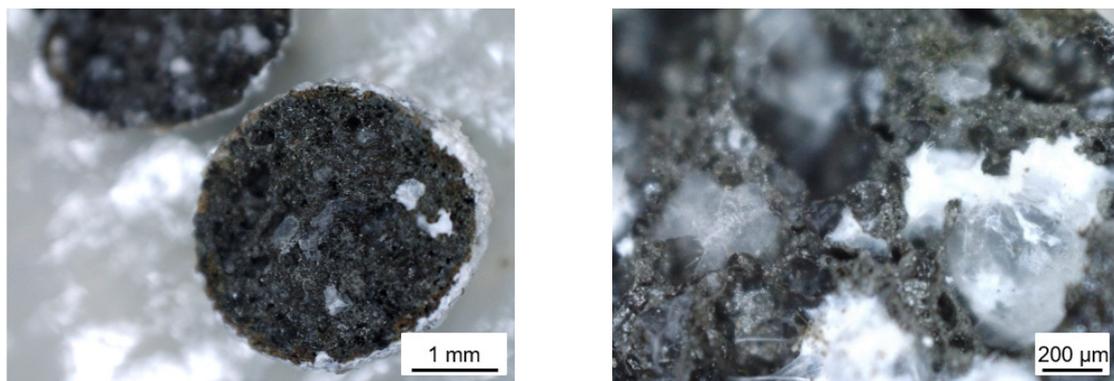


Abbildung 2-4: Nahaufnahme (links) und mikroskopischer Zoom (rechts) geteilter Blähtonkugeln, welche mit einer bakterienbasierten Suspension imprägniert (Vakuumofen) und anschließend getrocknet wurden. Die weißen Geflechte im Inneren sowie an der Außenschale bilden ein Gemisch aus Bakteriensporen, Calciumlaktat und Hefeextrakt.

Als gängige Evaluierungsverfahren der Heilungseffizienz werden, ähnlich zu den Hydrogelen, neben stereomikroskopische Aufnahmen auch Permeabilitätsuntersuchungen mit Wasserdurchfluss- bzw. Wasserabsorptionsmessungen angewendet [Mullem et al. 2017, Tziviloglou et al. 2016a, Tziviloglou et al. 2017b]. Die in zahlreichen Studien veröffentlichten Heilungsraten hängen u. a. sehr stark von den individuellen Versuchsaufbauten, Lagerbedingungen, Bakterienstämmen, Verkapselungstechniken und Rissinitiiierungen ab. Konformität herrscht bei der Art der Wassereexposition. Im Verhältnis zu einer stetigen Unterwasserlagerung, welche bei einer effizienten autogene Heilung förderlich ist, lässt sich mit Nass-/Trockenzyklen eine verstärkte bzw. beschleunigte bakterienbasierte Selbstheilung erzielen [Tziviloglou et al. 2016a]. Jedoch sind diese Tests meist auf Mörteltestkörper im Labormaßstab ausgelegt und führen häufig zu stark schwankenden Messergebnissen. Detaillierte Analysen zur

kristallinen Oberflächenstruktur der Rissflanken nach der Heilungsphase mit dem ESEM<sup>3</sup> oder FTIR-Spektrometer<sup>4</sup> sind meist nur sehr ungenau und liefern häufig keine quantitativen Aussagen.

Eine weitere Mikroverkapselungsmethode des Bakterienstammes *Bacillus sphaericus*, basierend auf einem patentierten In-situ-Polykondensationsverfahren (Patent WO2010142401), wurde von Devan Chemicals N.V. entwickelt und in Kapitel 7.2 für große Betonplatten („ME“-Testkörper) angewandt. Dieses Verkapselungsverfahren eignet sich für die Herstellung von flüssigen Kernen mit Schalenwerkstoffen auf Basis mehrerer mit Formaldehyd vernetzter Aminverbindungen (Abbildung 2-5). Durch den flüssigen Trägerstoff kann sich das in Pulverform vorliegende Heilmittel (Sporen + Nährstoffe) durch Kapillarbewegung nach einer Freisetzung im Riss verteilen.

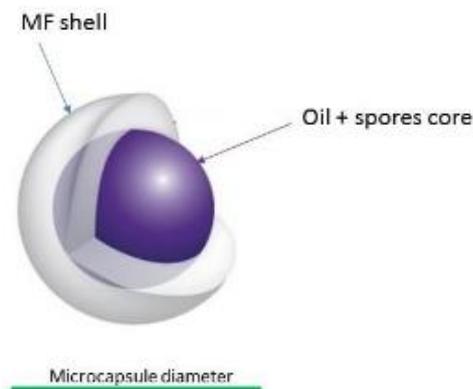


Abbildung 2-5: Schematisches Kernschalenmodell einer Mikrokapselformung mit Melamin-Formaldehyd-Schale (MF) und Öl als Träger [Consortium 2017].

### Mischkulturen (MUC)

Da die Produktion von axenischen Bakterienkulturen noch sehr aufwendig und teuer ist, wird auch die Herstellung von nicht-axenischen Mischkulturen („MUC“) mit speziellen zyklisch thermischen Selektionsverfahren angestrebt. Diese Mischkulturen können aus mikrobiologisch aktiven hochwertigen landwirtschaftlichen Nebenprodukten, aber auch aus Abwässern oder Belebtschlamm gewonnen werden. Das verwendete zyklisch angereicherte ureolytische Pulver (Kapitel 7.1, „MUC“-Testkörper), hergestellt von Avecom NV, stammte aus einem Teilstrom einer Pflanzenkläranlage sowie einem anaeroben Granulat und diente zugleich als Mikroverkapselung. Eine detaillierte Erläuterung zum Herstellungsverfahren sowie zur Überprüfung auf deren Selbstheilungspotential gibt da Silva et al. (2015).

<sup>3</sup> Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM): spezifiziertes Rasterelektronenmikroskop (REM)

<sup>4</sup> Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (FTIR)

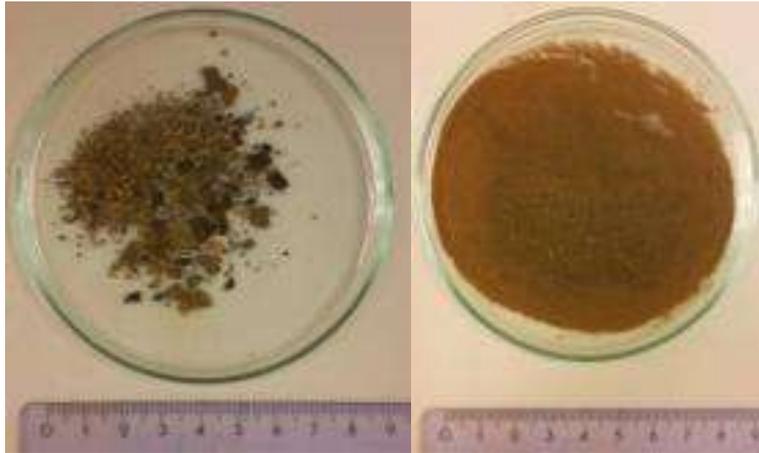


Abbildung 2-6: Zyklisch angereichertes ureolytisches Pulver zur Verwendung von autonomen Selbstheilungseffekten durch  $\text{CaCO}_3$ -Bildung. Links: Rohprodukt nach zyklischer thermischer Herstellung. Rechts: Finales Produkt nach Feinmahlung für die Zugabe in zementgebundenen Werkstoffen.

## 2.4 Polyurethanbasierte Heilung

Ein Vorteil von chemisch härtenden Klebstoffen (u. a. Epoxidharze, Polyurethane (PU), Cyanacrylat, Silikone) als Heilmittel, gegenüber (verstärkt) autogenen bzw. bakterienbasierten Rissverschließungstechniken, ist das breite Spektrum an mechanischen Eigenschaften und die guten Verbundeigenschaften mit vielen Trägermaterialien. Dazu zählen u. a. Dichtigkeit, Flexibilität, Steifigkeit und hohe Festigkeit, sowohl bei statischen als auch bei zyklisch-dynamischen Beanspruchungen. Des Weiteren erfolgt die Rissverschließung nach sofortiger Freisetzung der Polyurethane, welche je nach Typ innerhalb weniger Stunden aushärten. Um die Dauerhaftigkeit und strukturelle Integrität von Betonteilen zu verlängern und wiederherzustellen, werden daher eine Vielzahl an unterschiedlichen polyadditionsbasierten Rissverfüllstoffen eingesetzt. Dies geschieht in der gegenwärtigen Praxis entweder durch Injektionsverpressungen oder durch natürliche Schwerkraft [Issa et al. 2007].

Nachteil dieser manuellen Verfahren ist, dass die geschädigten Stellen zunächst detektiert und für eine Ertüchtigung frei zugänglich sein müssen. Dieser Prozess soll mit unterschiedlichen Selbstheilungsmethoden optimiert werden. Erste Studien zur autonomen Selbstheilung mit verkapselten Klebstoffen u. a. von Dry et al. (2003) und Li et al. (1998) führten nachfolgend zu zahlreichen unterschiedlichen Anwendungs- und Forschungsschwerpunkten [Feiteira et al. 2014, 2016, Feiteira et al. 2017, Gilabert et al. 2017, Gruyaert et al. 2015, Joseph et al. 2010, Minnebo et al. 2017, Van Tittelboom et al. 2018]. Dabei steht besonders die (Mikro-) Verkapselungstechnik im Vordergrund [Araújo et al. 2017, Gupta et al. 2016, Hilloulin et al. 2015, Šavija et al. 2016, Tsangouri et al. 2019b, Xue et al. 2018]. Die Verwendung von spröden und leicht zerbrechlichen Materialien, wie Glas- oder Keramikkapillaren, ist für den Herstellungsprozess von Beton in der Praxis nicht geeignet. Um den Mischvorgang ungeschädigt zu überstehen und gleichzeitig ein praktikables und effizientes Selbstheilungskonzept zu bilden, muss ähnlich zur autogenen (Kapitel 2.1) oder autogen verstärkten

(Kapitel 2.2) bzw. bakterienbasierten Heilung (Kapitel 2.3) eine sphärische Mikroverkapselung der Klebstoffe entwickelt werden. Die komplexe Kombination der zu berücksichtigten Randbedingungen erschweren bis heute eine praktikable Anwendung. Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes HealCon wurden jedoch vielversprechende Ansätze entwickelt [Consortium 2017], welche eine Etablierung auf dem Markt vorantreiben sollen.

Um die Selbstheilung nachhaltiger zu gestalten, werden auch Techniken zur Einbringung vaskulärer Netzwerke zur Aufrechterhaltung des Heilungskonzeptes über die gesamte Lebensdauer der Betonbauteile konzipiert und auf deren Praxistauglichkeit evaluiert [Davies et al. 2015, Davies et al. 2018, Tsangouri et al. 2019c].

Nachfolgend wird der Fokus auf zwei unterschiedliche polyurethanbasierte Injektionsmittel gelegt, welche in dieser Arbeit Anwendung fanden.

**SLV:** Das sehr niedrigviskose (200 mPa.s bei 25°C) und hydrophobe Einkomponenten-Polyurethan HA Flex SLV AF (W. R. Grace & Co.) dringt sehr tief in dichte Fugen und Haarrisse ein und bildet nach der Aushärtung mit Wasser oder Luft einen zähen, flexiblen und geschlossenzelligen Polyurethanschaum. Laut Hersteller können somit Abdichtungen bis 0,5 mm Rissbreite erzielt werden. Die Reaktionszeit ist abhängig von der Temperatur und verwendeter Beschleuniger (HA Flex Cat AF). In vorangegangenen Studien von Feiteira et al. (2014, 2016), Feiteira et al. (2017), Gruyaert et al. (2015), Tsangouri et al. (2015) hatte sich dieses Polyurethan als geeignetes Heilmittel für die Wiedererlangung mechanischer Kennwerte, wie Steifigkeit und Maximallast, bei Zug- und Biegezugversuchen erwiesen. Der starke kraftschlüssige Verbund der Rissflanken sowie die hohe Flexibilität bei Verwendung ohne Beschleuniger ermöglichte Dehnraten bis zu 100 %. Überdies kam es während der Wiederbelastung der verschlossenen Risse stellenweise zur Überschreitung der maximalen Zugfestigkeit des zementgebundenen Werkstoffes, sodass parallel zu den initialen Rissen neue Biegerissformationen entstanden sind. Eine Analyse der Rissoberflächen an Mörtelprismen zeigte allerdings, dass die schaumartige Zellstruktur des erhärteten SLVs stellenweise eine unregelmäßige und nicht-geschlossene Form aufweist. Dies fördert den Eintrag von Flüssigkeiten sowie Gasen und erhöht die Gefahr von Material- bzw. Strukturschädigungen aufgrund von Permeabilitätseffekten [Feiteira et al. 2017].

**MEYCO:** Der einkomponentige PU-Injektionsschaum MEYCO MP 355 1K (BASF SE) reagiert nur in Kontakt mit Wasser oder Feuchtigkeit und ist daher für wasserführende Risse konzipiert. Im Gegensatz zum „SLV“ ist es mit 320 mPa.s (bei 23°C) deutlich viskoser und besitzt in Reaktion mit 10 % Entwicklungsschleuniger (70 mPa.s bei 23°C) sowie Wasser eine Expansionsrate von 25-30. Das durch die Risse entstehende zusätzliche Volumen kann somit wieder aufgefüllt werden (Abbildung 2-7, rechts). Die Startzeit der Reaktion ist mit 10 -120 Sekunden (bei 5-20°C) sehr gering, was eine schnelle Rissverfüllung erfordert. Verschiedene Tests an biegebelasteten Mörtelprismen (60 x 60 x 220 mm) und zugbelasteten zylindrischen Testkörpern mit „MEYCO“ gefüllten Kapillaren von Van Tittelboom et al. (2011) zeigten bereits vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich Wasserabdichtung und Kraftschlüssigkeit.

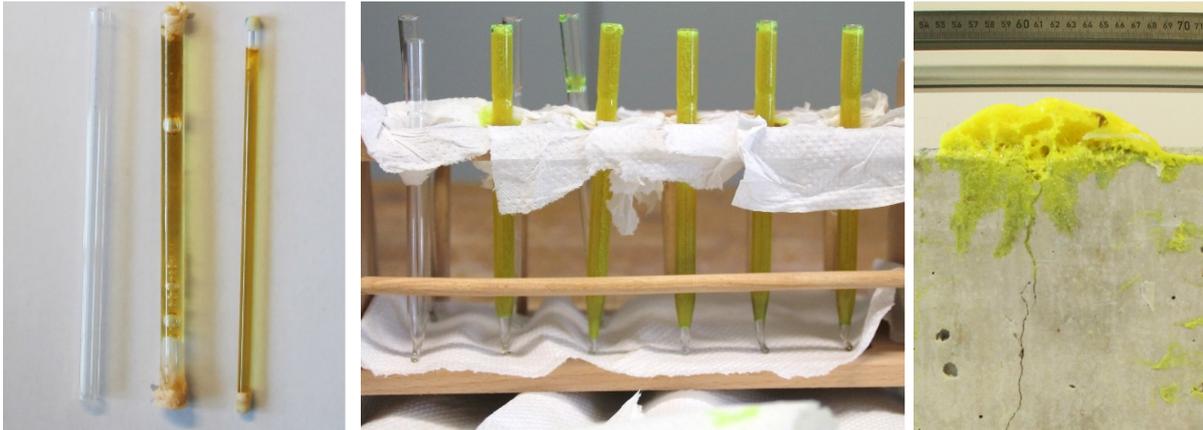


Abbildung 2-7: Links, Mitte: Glaskapillaren gefüllt mit polyurethanbasiertem Heilmittel. Rechts: Schaumartige Struktur nach manueller Rissinjektion von PU-Injektionsschaum und Beschleuniger.

Als Verkapselungstechnik wurden in dieser Arbeit für das Präparat „SLV“ und „MEYCO“ Glaskapillaren mit einer Länge von 100 mm mit einem Innendurchmesser von 3,3 („SLV“) bzw. 4 mm („MEYCO“) gewählt (Abbildung 2-7). Die Verschließung und Abdichtung erfolgte mit einem schnellerhärtenden Klebstoff aus Methylmetacrylat (X60, HBM Germany). Diese Art der Verkapselung dient allerdings nur als vereinfachende Hilfsmaßnahme zur Untersuchung der autonomen Rissverschließung sowie dessen Verbundeigenschaften unter Forschungsbedingungen. Um eine praxistaugliche Anwendung zukünftig gewährleisten zu können ist jedoch eine effiziente Mikroverkapselung der Polyurethane notwendig, sodass ein kontrollierbarer Zuschlagsstoff vorliegt, welcher dem Frischbeton untergemischt werden kann.



## 3 Grundlagen elastischer Wellenausbreitung in Festkörpern

Im Hinblick auf die durchgeführten Untersuchungen in dieser Arbeit sollen die relevantesten physikalischen Zusammenhänge der akustischen Wellenausbreitung genannt werden. Dieser Überblick bildet die Basis für das Verständnis der berechneten Materialkenngrößen. Darauf aufbauend werden in den folgenden Unterkapiteln der einzeln aufgeführten Prüfverfahren weitere detaillierte und spezifizierte Messgrößen beschrieben und erläutert. Die Bestimmung von Messgrößen (z. B. dynamischer Elastizitätsmodul) zur Beschreibung der Materialcharakteristika kann dabei aus verschiedenen zerstörungsfreien Prüfverfahren gewonnen werden und in einen mathematischen Zusammenhang gebracht werden. Damit diese Zusammenhänge bei der Anwendung ihre Gültigkeit erhalten, ist eine genaue Beschreibung der messtechnischen Randbedingungen notwendig. Allerdings sind nicht immer alle Einflussgrößen innerhalb einer Messkette bestimmbar. Ebenfalls müssen häufig vereinfachte Annahmen getroffen werden, da die zu untersuchenden Objekte nicht immer den physikalischen Randbedingungen entsprechen (z. B. Isotropie, Homogenität). All diese praxisrelevanten Einschränkungen können zu leicht abweichenden Ergebnissen innerhalb einer Messgröße führen und sind bei der Datenanalyse/-Bewertung zu berücksichtigen.

Akustische Wellen („Schallwellen“) beschreiben die räumliche Ausbreitung einer Schwingung in Medien. Die elastische Kopplung der schwingenden Masseteilchen führt zu einer Wellenausbreitung, welche sich in verschiedenen Arten mit unterschiedlichen Eigenschaften ausbreiten können. Geht dieser Transport nur mit kleinsten Verformungen in einem linear-elastischen Festkörper einher, so kann mit Hilfe der Kontinuumsmechanik bzw. der Elastizitätstheorie ein Zusammenhang aus den resultierenden Messergebnissen der zerstörungsfreien Prüfung (z. B. Resonanzfrequenz, Schallausbreitungsgeschwindigkeit) und typischen Materialkonstanten (z. B. Elastizitätsmodul, Poisson-Zahl) geschaffen werden.

Die folgenden mathematischen Herleitungen stammen u. a. aus Gross et al. (2018), Hahn (1985), Lerch et al. (2009), Mahnken (2015), Pohl (1969), Schiebold (2015), Šutilov (1984).

### 3.1 Elastische Konstanten

Unter Berücksichtigung der Annahme infinitesimal kleiner akustischer Amplituden innerhalb eines ideal elastischen Mediums, besteht durch das Hooksche Gesetz ein proportionaler Zusammenhang zwischen Deformation und Spannung. Der Spannungstensor  $\sigma_{ik}$  und der Deformations- (Verzerrungs)tensor  $\varepsilon_{lj}$  bildet folgende allgemeine Abhängigkeit:

$$\sigma_{ik} = \sigma_{ik}(\varepsilon_{lj}) \quad \text{mit } i, k, l, j = 1, 2, 3 \quad \text{Gl. 3-1}$$

In allgemeiner Tensorschreibweise lautet das Hooksche Gesetz:

$$\sigma_{ik} = c_{iklj}(\varepsilon_{lj}) \quad \text{Gl. 3-2}$$

Die elastischen Eigenschaften homogener isotroper Festkörper, welche gleiche mechanische und chemische Eigenschaften in alle Richtungen besitzen, reduzieren die unabhängigen Konstanten innerhalb  $c_{iklj}$  (Gl. 3-2) auf 21 Komponenten. Schließlich treten nur noch zwei unabhängige Moduln auf, welche als Lamésche Elastizitätskonstanten  $\lambda$  und  $\mu$  bezeichnet werden. Somit ergibt sich vereinfachend, unter Berücksichtigung der Symmetrieelemente:

$$\sigma_{ik} = \lambda\theta\delta_{ik} + 2\mu\varepsilon_{ik} \quad \text{mit } i, k = 1, 2, 3, \quad \text{Gl. 3-3}$$

wobei  $\theta$  die Volumenänderung (definiert für ein Kartesisches Koordinatensystem):

$$\theta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \quad \text{Gl. 3-4}$$

und  $\delta_{ik}$  den Einheitsvektor (Kronecker-Symbol) angibt. Aufgelöst nach der Deformationskomponente  $\varepsilon_{ik}$  ergeben sich für ein dreidimensionales elastisches Materialverhalten eines isotropen Mediums folgende allgemeingültige Gleichungen:

$$\varepsilon_{11} = \frac{2(\lambda + \mu)\sigma_{11} - \lambda\sigma_{22} - \lambda\sigma_{33}}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} \quad \text{Gl. 3-5}$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{-\lambda\sigma_{11} + 2(\lambda + \mu)\sigma_{22} - \lambda\sigma_{33}}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} \quad \text{Gl. 3-6}$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{-\lambda\sigma_{11} - \lambda\sigma_{22} + 2(\lambda + \mu)\sigma_{33}}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} \quad \text{Gl. 3-7}$$

Da allerdings keine Kopplung zwischen Schubspannungen und Dehnungen sowie zwischen Normalspannungen und Scherungen besteht, gilt:

$$\varepsilon_{11} = -\varepsilon_{22} = -\varepsilon_{33} \quad \text{Gl. 3-8}$$

Unter Einbeziehung des Elastizitätsmoduls (E- Modul), definiert über das Hooksche Gesetz:

$$E = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} \quad \text{Gl. 3-9}$$

und der Querkontraktions-Konstanten (Poisson-Koeffizienten):

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \right| = \left| \frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}} \right| \quad \text{Gl. 3-10}$$

können die Lamé-Konstanten durch E und  $\nu$  ausgedrückt werden:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad \text{Gl. 3-11}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{Gl. 3-12}$$

Liegt eine elastische Volumendehnung mit  $\varepsilon_{el} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$  vor, so ergibt sich der Kompressionsmodul K zu:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad \text{mit } \nu < 0,5 \quad \text{Gl. 3-13}$$

Der Schub- bzw. Schermodul G resultiert aus der Annahme einer reinen Scherung mit  $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{12} = \sigma_t/2\mu$  (halbierter Scherwinkel in x-y-Ebene):

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{Gl. 3-14}$$

Es zeigt sich, dass die Spannungs- und Dehnungseigenschaften eines linear-elastisches isotropen Mediums in einem Zusammenhang aus Kompressionsmodul, Elastizitätsmodul, Schermodul und Querkontraktionszahl stehen.

### 3.2 Wellengleichung

Die Ausbreitung von Schallwellen in isotropen Festkörpern lässt sich aus der allgemeinen Bewegungsgleichung der Mechanik (zweites Newtonsches Axiom) herleiten:

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad \text{mit } i, k = 1, 2, 3 \quad \text{Gl. 3-15}$$

wobei  $\sigma_{ik}$  der Spannungstensor der Vorwärtsbewegung,  $u_i$  die Verschiebungskomponente entlang der Koordinatenrichtung (mit  $x_k = x, y, z$ ) und  $\rho$  die Gleichgewichtsdichte beschreibt. Im Falle kleinster Verschiebungen gilt für den Verzerrungszustand in einem Punkt (Cauchyscher Verzerrungstensor):

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \text{div } \vec{u} \quad \text{mit } i, k = 1, 2, 3 \quad \text{Gl. 3-16}$$

Die Differenzierung von  $\sigma_{ik}$  nach  $x_k$ , ausgedrückt durch die Verschiebungen mit Gl. 3-2 und Gl. 3-16, erlaubt die Beschreibung der Ausbreitung akustischer Wellen über die partielle Differentialgleichung:

$$\mu \Delta \vec{u} + (\mu + \lambda) \text{grad div } \vec{u} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad \text{Gl. 3-17}$$

wobei  $\Delta$  der Laplace-Operator ist:

$$\Delta = \sum_i \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \quad \text{Gl. 3-18}$$

Der Verschiebungsvektor  $\vec{u}$  lässt sich nach den mathematischen Vorschriften der Vektoranalysis in zwei Vektoranteile zerlegen und superponieren.  $\vec{u}_L$  ist verantwortlich für die Längsdeformation,  $\vec{u}_T$  für die Scherdeformation.

Ist das Vektorfeld wirbelfrei, gilt für den jeweiligen Rotationsanteil:

$$\text{rot } \vec{u}_L = 0, \quad \text{Gl. 3-19}$$

$$\text{rot } \vec{u}_T = \text{rot } \vec{u} \quad \text{Gl. 3-20}$$

Für ein quellfreies Vektorfeld ist der divergente Anteil der Scherung null:

$$\operatorname{div} \vec{u}_T = 0, \quad \text{Gl. 3-21}$$

$$\operatorname{div} \vec{u}_L = \operatorname{div} \vec{u} \quad \text{Gl. 3-22}$$

Mit diesen aufgeführten Randbedingungen, sowie der Voraussetzung keiner äußeren Kräfte, lässt sich die akustische Wellenausbreitung in zwei Raumwellentypen aufteilen. Kommt es zu einer reinen Längsdeformation, ist diese wirbelfrei und wird als Longitudinalwelle bezeichnet. Mit der Bedingung aus Gl. 3-19, eingesetzt in Gl. 3-17 folgt:

$$\Delta \vec{u}_L = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad \text{Gl. 3-23}$$

Deren Schallausbreitungsgeschwindigkeit  $c_L$  ist definiert als:

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{3K(1-\nu)}{\rho(1+\nu)}} \quad \text{Gl. 3-24}$$

Ist die Wellenausbreitung quellfrei, findet eine reine Tangentialbewegung der Teilchen statt (Gl. 3-21 in Gl. 3-17):

$$\Delta \vec{u}_T = \frac{1}{c_S^2} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad \text{Gl. 3-25}$$

mit der Scher- /Transversalwellengeschwindigkeit  $c_S$ :

$$c_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{Gl. 3-26}$$

Das Verhältnis der Longitudinalgeschwindigkeit zur Scherwellengeschwindigkeit lässt sich formulieren zu:

$$\frac{c_L}{c_S} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} \quad \text{mit } 0 < \nu < 0,5^5 \quad \text{Gl. 3-27}$$

<sup>5</sup> negative Poisson-Konstanten sind nicht berücksichtigt

Gl. 3-27 zeigt, dass das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten nur von der Querkontraktionseigenschaft abhängig ist. Ein Wert von 0,5 der Poisson-Konstanten würde eine Flüssigkeit ohne Schwerwellenanteil charakterisieren. Isotrope Feststoffe wie z. B. Beton oder Aluminium besitzen eine Querkontraktionszahl von circa 0,2-0,4. Das Geschwindigkeitsverhältnis  $\frac{c_L}{c_S}$  liegt folglich zwischen circa 1,5 und 2,5. Dieser Zusammenhang hilft Messdaten, gewonnen durch zerstörungsfreie Prüfverfahren, besser zu verstehen und zu interpretieren.

Während in isotropen und homogenen unbegrenzten Festkörpern ausschließlich Raumwellen in Form von Longitudinal- und Transversalwelle propagieren, kann bei endlich begrenzten Medien zusätzlich u. a. eine Oberflächenwelle (Rayleigh-Welle) auftreten. Diese werden durch die Interferenz von Längs- und Querwellen an der Grenzfläche erzeugt. Rayleigh-Wellen erscheinen in einer elliptischen rückwärts gerichteten Bewegung. Die Verschiebungskomponente nimmt dabei mit zunehmender Tiefe exponentiell ins Medium ab. Unter Berücksichtigung der mathematischen Randbedingungen, dass die Spannungen bei beliebigen Deformationen an der freien Oberfläche null sind und sich die Rayleigh-Welle längs der freien Grenze ausbreitet, kann folgende Gleichung für eine Oberflächenwelle hergeleitet werden [Grosse 1996, Lerch et al. 2009]:

$$K^6 - 8K^4 + (24 - 16\gamma^2)K^2 + 16(\gamma^2 - 1) = 0 \quad \text{Gl. 3-28}$$

wobei

$$K = \frac{c_R}{c_S} \quad \text{mit } c_R \cdot \text{Rayleigh-Wellengeschwindigkeit} \quad \text{Gl. 3-29}$$

und

$$\gamma = \frac{c_S}{c_L} \quad \text{Gl. 3-30}$$

ist.

Da  $\gamma$  der Kehrwert des Verhältnisses von Longitudinal- zur Schwerwellengeschwindigkeit ist (Gl. 3-27) und ausschließlich von der Poisson-Konstanten abhängt, kann eine approximative Lösung für die Rayleigh-Wellengeschwindigkeit angegeben werden:

$$c_R \approx c_S \frac{(0,874 + 1,12\nu)}{1 + \nu} \quad \text{Gl. 3-31}$$

Folglich lässt sich auch die Transversalwellengeschwindigkeit  $c_S$  aus einer messtechnischen Bestimmung der Rayleigh-Wellengeschwindigkeit, in Abhängigkeit von  $\nu$ , berechnen bzw. abschätzen.

Die Herleitung bzw. der Zusammenhang der in diesem Kapitel aufgeführten elastischen Wellenarten beschränken sich auf die relevanten Charakteristika, welche auch für den experimentellen Teil in der

dieser Arbeit entscheidend sind. Weitere Wellenarten, wie z. B. Love- oder Lamb-Wellen werden nicht explizit in ihrer Theorie erläutert.

### 3.3 Physikalische Grundlagen und Wechselwirkungen

Beton ist ein mehrphasiger, heterogener und aus multiplen Längenskalen bestehender Werkstoff, welcher aus einer Zement-Matrix sowie feinem Sand und groben Kieszuschlägen besteht. Die Heterogenitäten im Beton, wie z.B. die zufällige Verteilung der Gesteinszuschläge, führen bei Wellenlängen in gleicher Größenordnung u. a. zu einer starken Streuung und Absorption der Ultraschallwellen.

Im Folgenden werden die relevanten Wechselwirkungen zwischen einer elastischen Welle bzw. Ultraschallwelle und Festkörpermaterie aufgezeigt. Diese basieren hauptsächlich auf den Gesetzen der Optik: Reflexion, Brechung, Streuung, Beugung, Absorption, geometrische Auffächerung und Dissipation. Die physikalischen Zusammenhänge können u. a. in Krautkrämer et al. (1986a), Lerch et al. (2009), Schubert (2000) in ausführlicher Form nachverfolgt werden.

#### Akustische Impedanz

Als akustische Impedanz  $Z$  wird das Produkt aus der Dichte  $\rho$  und Schallgeschwindigkeit  $c_L$  eines Ausbreitungsmediums bezeichnet. Es beschreibt den Widerstand der sich ausbreitenden Schallwelle.

$$Z = \rho c_L \quad \text{Gl. 3-32}$$

#### Brechung und Reflexion

Die Größe des Impedanzunterschieds zwischen zwei Stoffen ( $\Delta Z_{1,2}$ ) gibt das Reflexions- und Transmissionsvermögen an einer Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Materialien wieder; ausgedrückt durch den Reflexionskoeffizienten  $R$  und Transmissionskoeffizienten  $T$ :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Gl. 3-33}$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Gl. 3-34}$$

Kommt es zu einem Schrägeinfall der Schallwelle auf eine ebene Fläche, so hängt der Reflexions- und Transmissionsanteil vom Einfallswinkel  $\alpha_e$  ab. Bei identischer Schallausbreitungsgeschwindigkeit beider Materialien ist der Einfallswinkel  $\alpha_e$  gleich dem Reflektionswinkel  $\alpha_r$ . Unterscheiden sich die Schallausbreitungsgeschwindigkeiten beider Medien, so können reflektierte und transmittierte Wellenanteile mit einer abweichenden Polarisierung (Modenkonzersion) auftreten [Krautkrämer et al.

1986b]. Folglich unterscheiden sich auch der Reflektions- und Transmissionswinkel der neuen Wellenfront.

Das allgemeine Brechungsgesetz (Snelliussches Brechungsgesetz) liefert den Zusammenhang von Reflexion, Transmission und Schallwellengeschwindigkeit:

$$\frac{\sin \alpha_e}{\sin \alpha_d} = \frac{c_1}{c_2} \quad \text{Gl. 3-35}$$

wobei  $\alpha_d$  den Transmissionswinkel wiedergibt.

### Streuung, Absorption und geometrische Divergenz

Die geometrische Divergenz beschreibt die Amplitudenabnahme der Welle mit zunehmendem Abstand von ihrer Quelle. Sie ist frequenzunabhängig und ausschließlich von der Wellenmode sowie des elastischen Körpers abhängig. Sie basiert rein auf der Wellengleichung verlustfreier Medien und beinhaltet keine Energieumwandlungsprozesse, wie z. B. in Wärme. Für eine Kugelwelle beträgt die ortsabhängige Amplitudenabnahme  $1/r$ , wobei für eine Rayleigh-Welle die Amplitudenabnahme mit  $1/\sqrt{r}$  berücksichtigt wird. Zudem zeigt sich, dass Rayleigh-Wellen mehr Energie transportieren. Wird eine elastische Welle an der Oberfläche eines Mediums induziert, transportiert nach Miller et al. (1955) die R-Welle ca. 67% der Energie, während P- und S-Welle 7% bzw. 26% ausmachen.

Die Begriffe Streuung und Absorption spielen bei der Prüfung von viskoelastischen Werkstoffen eine bedeutende Rolle. Die Charakterisierung von Materialeigenschaften sowie die Detektion von Unstetigkeitsstellen innerhalb eines zu untersuchenden Objekts werden häufig durch ihre Dämpfungseigenschaften beeinflusst. Zusammenfassend werden sie auch als Schallschwächung bezeichnet. Als Streuung wird die Schalldruckabnahme aufgrund der stofflichen Inhomogenität oder auch Anisotropie bezeichnet. Eine Trennung der Reflexions- und Beugungseffekte ist nicht mehr möglich. Da Beton aus einer Vielzahl von Streuern in unterschiedlichen Größenordnungen, wie z. B. Zementpartikel, Luftporen, Gesteinskörnung etc. besteht, ist die Theoriegrundlage einer sich konstant gleichmäßig ausbreitenden Schallwelle innerhalb eines isotropen und homogenen Mediums nicht mehr gültig. Aufgrund der hohen Anzahl an Streuern in Beton erfährt eine sich ausbreitende elastische Welle eine Vielzahl an Mehrfachstreuungen, wodurch es zu einer Überlagerung von Streufeldern kommt. Entscheidendes Kriterium für die Stärke der Streuung ist das Verhältnis von Korngröße zur Wellenlänge. Liegt die Wellenlänge der elastischen Welle im Größenordnungsbereich der charakteristischen Inhomogenität oder sogar darunter, führt dies zu einer verstärkten Streuung und somit zu einer erhöhten Schallschwächung. Die (intrinsische) Absorption charakterisiert die Schalldämpfung infolge von inneren Reibungsprozessen der schwingenden Teilchen. Im Vergleich zur Streuung sind die Absorptionseffekte, auch als Dissipation bezeichnet, sehr gering. Für die Auswertung der experimentellen Ultraschalldaten in dieser Arbeit können die dissipativen Mechanismen in Form einer

Codawellen<sup>6</sup>-Analyse einen zusätzlichen Mehrwert erbringen. Eine detaillierte Erläuterung findet sich in Kapitel 4.1. Für die Schwingungsanalyse findet sich eine ausführliche Definition der angewandten Dämpfungsparameter sowie die experimentelle Bestimmung der notwendigen Freiheitsgrößen in Kapitel 4.3.

### Harmonische Schwingung und stehende Welle

Ein zeitlich und räumlich periodischer Vorgang, definiert als Welle, lässt sich auch mathematisch in folgender Form beschreiben:

$$u(x, t) = Ae^{-i(kx - \omega t - \phi)} \quad \text{Gl. 3-36}$$

wobei

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \quad \text{Gl. 3-37}$$

die Wellenzahl, A die Schwingungsamplitude,  $\omega = 2\pi/T$  die Kreisfrequenz,  $\phi$  die Phase und die Verschiebung  $u$  orts- und zeitabhängig ist.

Die Phasengeschwindigkeit, definiert durch die Verschiebung der Welle um eine Wellenlänge innerhalb einer Schwingungsperiode T, ergibt sich zu:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} = f \cdot \lambda \quad \text{mit } f: \text{ Schwingungsfrequenz} \quad \text{Gl. 3-38}$$

Die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von den Materialkonstanten sowie ihre Verknüpfungen sind in Kapitel 3.1 erläutert.

Isotrope und homogene elastische Körper mit endlicher Dimension und einer festen Geometrie weisen an ihren Grenzflächen üblicherweise (Randbedingung: Umgebung Luft) einen hohen Impedanzkontrast mit

$$Z_1 \gg Z_2 \quad \text{mit } 1,2: \text{ elastischer Körper } \quad \text{Gl. 3-39}$$

auf<sup>7</sup>. Propagiert eine Welle durch solch einen Körper, so wird die Welle an den festen Enden (schallharte Wände) überwiegend reflektiert. In Abhängigkeit von der Körpergeometrie treten, aufgrund des hohen

<sup>6</sup> hinterer Signalwellenanteil, welcher aus Rückstreuungseffekten durch zahlreiche Heterogenitäten, die gleichmäßig in der Betonmatrix verteilt sind, charakterisiert ist.

<sup>7</sup> Der Fall für  $Z_1 \ll Z_2$  wird hier nicht weiter berücksichtigt.

Reflexionskoeffizienten (Gl. 3-33) für bestimmte Frequenzen und Wellenlängen, Mehrfachreflexionen auf, welche sich gleichsinnig überlagern. Dabei summieren sich die entgegenlaufenden Wellen nach dem Superpositionsprinzip auf. Es kommt zu stehenden Wellen, welche den Körper zu Eigenschwingungen anregen. Die maximale Amplitude tritt in den Schwingungsbäuchen auf, im Gegensatz dazu findet in den Schwingungsknoten keine Teilchenbewegung statt. Die spezifische Wellenlänge der n-ten harmonischen Eigenschwingungen zwischen zwei festen Enden ist definiert über die Körperlänge  $l$  mit:

$$\lambda = \frac{2l}{n} \quad \text{mit } n=1, 2, 3, \dots \quad \text{Gl. 3-40}$$

Aufgrund des Dämpfungscharakters absorbierender und streuender Medien nimmt auch die Druckamplitude der stehenden Welle exponentiell ab:

$$u(t) = A_0 e^{-\alpha t} \quad \text{Gl. 3-41}$$

wobei  $\alpha$  der Dämpfungskoeffizient der Systemantwort des Gesamtsystem ist und  $A_0$  die Amplitude zum Zeitpunkt  $t=0$  ist. Da in dieser Arbeit der Schwerpunkt nicht auf den Absolutwerten einzelner Freiheitsgrade liegt, sondern vielmehr ein relativer Vergleich nach unterschiedlichen Beanspruchungszuständen sowie mit Referenztestkörpern angestrebt wurde, wird auf eine detaillierte Erläuterung der Bewegungsgleichung für harmonische Schwingungen mit Dämpfungsanteil hier verzichtet.

## 4 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Bei der Untersuchung von zementgebundenen Werkstoffen mit Selbstheilungseigenschaften werden verschiedenste Verfahren und Methoden eingesetzt, um möglichst detaillierte Kenntnisse von den neuen Materialeigenschaften sowie deren Effizienz zu erlangen [Çopuroğlu et al. 2013, Muhammad et al. 2016, Tang et al. 2015]. Neben relevanten werkstoffspezifischen Kennwerten, die z. B. Aufschluss über die Verarbeitbarkeit oder Festigkeiten geben, werden weiterführende Prüftechniken verlangt, welche die Aktivierung und Freisetzung der Heilungsmittel bzw. die Leistung der Heilungsprozesse überwachen. Oftmals sind diese Vorgänge auch stark miteinander verknüpft.

Experimentelle Techniken, welche die Rissabdichtung oder Rissheilung der unterschiedlichen autogenen und autonomen Heilmethoden überprüfen sollen, umfassen meist Dichtheits- und Permeabilitätstests oder Absorptionsmessungen. Mechanische Eigenschaften werden dabei mit Wiederbelastungsuntersuchungen (z. B. Druck-, Biegezugmessungen) ermittelt. Diese meist zerstörenden Validierungsansätze haben jedoch den Nachteil, dass die Testobjekte nach erstmaliger Prüfung nicht mehr für fortführende Messungen zur Verfügung stehen. Somit sind diese Techniken in der Praxis nur bedingt anwendbar. Um die Entwicklung von selbstheilendem Beton mit möglichst geringen Beeinträchtigungen zu verbessern, werden verstärkt minimalinvasive Methoden sowie zerstörungsfreie Prüf- und Evaluierungstechniken eingesetzt [Didier et al. 2018].

Im Gegensatz zu traditionellen und konservativen Testverfahren besitzen ZfP-Methoden zusätzlich das Potenzial, Bauteile bzw. Bauwerke in-situ in Groß- oder Feldexperimenten zu überwachen und zu bewerten. Studien konnten bereits zeigen, dass akustische Messtechniken, wie Ultraschall [Ahn et al. 2017, Camara et al. 2019, Hilloulin et al. 2016, In et al. 2013, Karaiskos et al. 2015, Liu et al. 2016, Pal Kaur et al. 2018, Tsangouri et al. 2015], die Resonanzfrequenzanalyse [Yang et al. 2009] oder die Schallemissionsanalyse [Feiteira et al. 2017, Granger et al. 2007, Malm et al. 2014, Tsangouri et al. 2013, Tsangouri et al. 2016, Van Tittelboom et al. 2012] geeignete Instrumente für eine effiziente Bewertung unterschiedlicher Heilungskonzepte sind.

Hinsichtlich der Evaluierung von zementgebundenen Werkstoffen, bringt die Anwendung akustischer ZfP-Verfahren jedoch auch gewisse Schwierigkeiten mit sich. Dies ist hauptsächlich auf die komplexe und strukturelle Inhomogenität des Baustoffs zurückzuführen. Besonders die Vielzahl an Dämpfungs- und Streumechanismen verursacht häufig eine sehr ungleichmäßige Signaldetektion, wodurch relevante Diskontinuitäten im statistischen oder auch systematischen Fehler untergehen können [Gaydecki et al.

1992]. Für die Anwendung zerstörungsfreier Messtechniken ist es daher essentiell, eine weitreichende Kenntnis vom zu untersuchenden Medium, als auch der angewendeten Messtechnik zu besitzen. Um vorab die beste Vorgehensweise, den notwendigen Aufwand und die zu erwartenden Erfolgsaussichten einer Versuchsdurchführung abschätzen zu können, werden zudem verstärkt numerische Simulationsberechnungen durchgeführt [Asadollahi et al. 2019, Nakahata et al. 2015, Tsangouri et al. 2018]. Im folgenden Kapitel werden die in dieser Arbeit angewandten akustischen Messtechniken sowie deren grundlegenden physikalischen Zusammenhänge erläutert.

## 4.1 Ultraschallverfahren

Elastische Wellen lassen sich durch die auftretenden zeitlichen und räumlichen Deformationen beschreiben. Wie in Kapitel 3.2 erwähnt, propagieren elastische Wellen in Festkörpern in verschiedenen Modi. Zu den wichtigsten Wellenarten gehören die Körperwellen. Dazu zählen die Kompressionswelle mit Partikelbewegungen in Richtung der Wellenausbreitung und die Scher- bzw. Transversalwelle, mit Partikelbewegungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Oberflächenwellen, wie z. B. Rayleigh- oder Lovewellen treten in endlichen Medien an deren Grenzflächen oder in mehrschichtigen Medien auf. Aufgrund der frequenzabhängigen Wechselwirkung zwischen der sich ausbreitenden akustischen Welle und den unterschiedlichen stofflichen Bestandteilen des Mediums sowie dessen Dimension (Kapitel 3.3) wird mit einer breitbandigen Frequenzanregung, neben dem kohärenten Wellenfeld, ein diffuses (inkohärentes) Wellenfeld [Sens-Schönfelder et al. 2009] erzeugt. Bei Beton, der z. B. aufgrund einer Beanspruchung geschädigt ist, können (Mikro-) Risse ebenfalls die Isotropie bzw. Homogenität und damit die Wellenausbreitung beeinflussen.

Für die Untersuchung der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen in Mikroebene, variierender Temperatur- und Spannungszustände sowie der Rissverschließung durch autonome und autogene Selbstheilungseffekte in zementgebunden Werkstoffen haben sich besonders die Analyseverfahren mit Ultraschall als geeignete Instrumente erwiesen. Kleinste strukturverändernde Effekte können, unter bestimmten Voraussetzung, u. a. aufgrund einer Änderung des Ersteinsatzes oder im diffusen Ultraschallbild mit hochauflösenden Abbildungsverfahren (z. B. ToFD<sup>8</sup>, Phased Array, SAFT<sup>9</sup>-Rekonstruktion) detektiert werden [Anugonda et al. 2001, Becker et al. 2003, Deroo et al. 2010, In et al. 2016, Mielentz 2008, Punurai et al. 2007, Schickert 2005, Schurr 2010].

In der aktiven Ultraschallprüfung werden typischerweise elastische Wellen mit Frequenzen zwischen 20 kHz und 10 MHz eingesetzt. Abhängig von den Frequenzen der Ultraschallwelle können im Bezug zu den Testkörperdimensionen und Größenordnungen der Diskontinuitäten unterschiedliche Frequenzregime definiert werden. Bei ungeschädigtem Beton zählen Zuschlagsstoffe wie z. B. Sand, Kies, Blähton und auch Luftporen dazu. Planès et al. (2013) definiert vier unterschiedliche mechanische Wellenausbreitungsregime für Beton, in deren sich die aktuellen (State of the Art) zerstörungsfreien

---

<sup>8</sup> Time-of-Flight Diffraction (ToFD)

<sup>9</sup> Synthetische Apertur Fokus Technik (SAFT)

Prüf- und Analysetechniken mit akustischen Wellen einordnen lassen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass sich die Frequenzbereiche nicht exakt trennen lassen, da der Übergang immer fließend ist.

### Niederfrequenzbereich und stationäres Wellenregime

Zum stationären Bereich gehören demnach Frequenzen unterhalb von 20 kHz, wobei die Wellenlänge  $\lambda$  größer als die Länge  $L$  des Testkörpers sein muss. Dabei bilden sich hauptsächlich stehende Wellen (Kapitel 3.3) aus, welche Gegenstand der Untersuchung im Structural Health Monitoring (SHM), in der Modal- als auch Schwingungsanalyse (Kapitel 4.2) sind.

### Typischer Ultraschallfrequenzbereich und einfaches Streuungsregime

Die Wellenlänge  $\lambda$  ist hier kleiner als die Objektlänge  $L$ , aber größer als die der Diskontinuitäten  $d$ :

$$d < \lambda < L$$

Gl. 4-1

Dabei interagiert die akustische Welle nur schwach mit dem Betongefüge. Das Medium kann als homogen betrachtet werden und die kohärenten Anteile im Wellenfeld dominieren. Allerdings führen selbst einfache Streueffekte und Reflexionen zu Modentransformationen der Welle, was Codawellen [Aki et al. 1975] entstehen lässt. Die Eindringtiefe der Welle hängt dabei sehr stark von deren Frequenz ab. Eine Balance zwischen Auflösungsvermögen und Signal-Rausch-Verhältnis ist entscheidend. Für Beton gilt ein geeignetes Frequenzband zwischen circa 20-150 kHz.

### Mesoskopisches Frequenzband und Mehrfachstreuungsregime

Beton als Multikompositwerkstoff beinhaltet Zuschlagsstoffe in der Größenordnung von wenigen Zehntel- oder Hundertstelmillimetern (z. B. Luftporen, Sand) bis hin zu mehreren Zentimetern (z. B. Kies). Ist die Wellenlänge  $\lambda$  kleiner oder in der Größenordnung der Zuschlagstoffe, was einer Frequenz oberhalb von ca. 100-150 kHz (in Abhängigkeit der Kiesgröße) entspricht, findet eine starke Mehrfachstreuung statt, welche sich als stark ausgeprägtes diffuses Wellenfeld in der Ultraschall-Coda wiederfindet. Da sich mit zunehmender Frequenz der zu berücksichtigende Volumenanteil an Streuern erhöht, müssen auch Dispersions- und Dissipationseffekte berücksichtigt werden, welche sich auf die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit auswirken [Anugonda et al. 2001, Cowan et al. 1998, Page et al. 1999]. Das mesoskopische Frequenzband ist definiert zwischen 150 kHz-1 MHz. Dieses Wellenfeld ist i. d. R. gut reproduzierbar und deterministisch.

### Intrinsische Dämpfung

Akustische Wellen mit Frequenzen oberhalb von 1 MHz<sup>10</sup> werden aufgrund von inneren Reibungseffekten (Dissipation) und Streuungen so stark gedämpft, dass sie für die Ultraschalltechnik kaum in Frage kommen.

Unter Beachtung dieser physikalischen Eigenschaften werden je nach Zielsetzung und zusätzlicher Randbedingungen unterschiedliche Mess- und Datenverarbeitungstechniken eingesetzt. Die Position der Sende- und Empfangssensoren definiert dabei den Messvorgang. Eine Ultraschallmessung in Transmission basiert auf der Ausbreitung einer elastischen Welle, die an einem bestimmten Punkt A induziert und an einem anderen Punkt B aufgezeichnet wird, wobei A und B typischerweise auf gegenüberliegenden Seiten liegen. Im Vergleich dazu basiert die Impulstechnik auf der Reflexion des angeregten Ultraschallimpulses, wobei die Sensoren A und B auf derselben Seite des Objekts angebracht sind. Im Zeitbereich ist die Schallausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallsignale der wichtigste Auswerteparameter. Weitere nützliche Informationen können durch die Amplituden- oder Energieauswertung des Signals, die Signaldauer oder Spitzenwerte über einem bestimmten Schwellenwert gewonnen werden. Eine Transformation der detektierten Signalform in den Frequenzbereich kann weitere Erkenntnisse über die Materialeigenschaften liefern [Cosmes-López et al. 2017]. Für die Auswertung lassen sich sowohl nur einzelne Wellenarten (z. B. P-, S-, R-Welle), zeitlich begrenzte Signalbereiche (z. B. kohärentes, inkohärentes) oder auch die volle Signalwellenform einbinden. Neben der Bestimmung der absoluten Schallgeschwindigkeit kann mit Hilfe der Codawelleninterferometrie (CWI) auch eine relative Änderung der Signalgeschwindigkeit ermittelt werden [Snieder et al. 2002, Snieder 2006]. Die CWI-Auswertetechnik wurde nach der Adaption aus der Seismik [Aki et al. 1975] stetig weiterentwickelt, wodurch es mittlerweile möglich ist, selbst kleinste Gefügeveränderungen von zementhaltigen Werkstoffen mit relativen Geschwindigkeitsveränderungen im Bereich von  $2 \cdot 10^{-5}$  zu detektieren [Larose et al. 2009]. Entscheidend ist jedoch, dass die oben genannten Ultraschallanalysemethoden, sowie ihre freien Parameter, sehr empfindlich auf den Messaufbau reagieren. Die Systemaufbauten sowie deren beteiligten Einzelkomponenten beeinflussen filterähnlich dabei die resultierenden Messdaten und müssen daher als ganzheitliche Messkette betrachtet werden [Grosse 1996]. Für die Messaufbauten und Einzelkomponenten wie z. B. Sensor-Richtcharakteristik, A/D-Wandler, Messkabel und Sensorankopplung lassen sich Systemübertragungsfunktionen ermitteln, mit denen eine Quantifizierung der Systemperformance möglich ist [Gore et al. 1979]. Eine detaillierte Erläuterung zu diesem Thema findet sich in Schmerr et al. (2007). Theoretisch kann nur auf diese Art und Weise eine quantitative Beschreibung der Eigenschaften von zementhaltigen Materialien, wie stoffliche Zusammensetzung, Aushärtezeit, Feuchtigkeitsgehalt oder Mikrostrukturparameter (z. B. Porengehalt oder Porenverteilung) innerhalb der aufgezeichneten Daten erfolgen. Sind allerdings ausschließlich vergleichende Messungen (Relativmessungen) relevant, können, bei kontinuierlicher Verwendung des gleichen Versuchsaufbaus,

---

<sup>10</sup> entspricht einer Wellenlänge  $\lambda$  kleiner 4,8 mm (bei maximaler Schallausbreitungsgeschwindigkeit  $c_L$  von ca. 4800 m/s).

systemstabile Übertragungsfunktionen meist unberücksichtigt bleiben. Diese grundlegenden Faktoren sind jedoch nicht zu verwechseln mit der Reproduzierbarkeit von Versuchsdurchführungen. Um die Zuverlässigkeit eines Messaufbaus zu beurteilen, muss dieser immer auf Reproduzierbarkeit getestet werden. Auch dabei ist entscheidend, wie stark sich die Materialcharakteristika innerhalb einer Testkörperserie auf die Ergebnisse auswirken. Diese Voruntersuchungen legen das benötigte Auflösungsvermögen fest. Numerische Simulationen können dabei unterstützend wirken. Messschwankungen, welche durch einen mehrfachen Messaufbau wie z. B. Sensorankopplung (thematisiert in Kapitel 4.4), Testkörperlagerung oder veränderte Umgebungsbedingungen entstehen, bestimmen die umsetzbare Detektionsauflösung mit entsprechender Fehleranalyse. Folglich ist die realisierbare Detektionsauflösung sowohl für eine quantitative als auch qualitative Messung ausschlaggebend.

#### 4.1.1 ToF-Verfahren

Das Time-of-Flight-Verfahren (ToF), oder auch Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) genannt, bestimmt die Laufzeit  $t$  der propagierenden elastischen Welle im Medium vom Quellort bis zur Empfängerposition. Dies erfordert die Bestimmung der Ankunftszeit der entsprechenden Wellenmode. Da die Kompressionswelle die höchste Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzt, hängt die Genauigkeit der Ersteinsatzbestimmung vom Signal-zu-Rausch (S/N)-Verhältnis ab [Grosse 1996]. Die Genauigkeit wird zusätzlich erhöht je stärker sich die Steigung des ersten Schallwellenzuges vom Hintergrundrauschen unterscheidet. Da die manuelle Ersteinsatzbestimmung aufgrund der meist hohen Signalrate beim Ultraschallverfahren zu aufwendig ist, wurden zahlreiche automatisierte Methoden für das sogenannte „Picking“<sup>11</sup> entwickelt [Bai et al. 2017, Kurz et al. 2005, Leonard 2000, Mborah et al. 2018, Molyneux et al. 1999, Radlmeier in Bearbeitung]. Für Untersuchungen an Beton hat sich der iterative Algorithmus nach dem Akaike Information Criterion, dem AIC-Picker, als geeignet erwiesen [Akaike 1974]. Wird zudem nur das signifikante Zeitsignalfenster (Gl. 4-2, Index  $w$ ) verwendet, in dem sich der Ersteinsatz befindet, so kann mit dem autoregressiven AIC-Picker eine qualitative Verbesserung der Ersteinsatzbestimmung erlangt werden [Kurz et al. 2005, Zhang et al. 2003]:

$$AIC(t_w) = t_w \cdot \log(\text{var}(R_w(t_w, 1))) + (T_w - t_w - 1) \cdot \log(\text{var}(R_w(1 + t_w, T_w))) \quad \text{Gl. 4-2}$$

wobei  $T_w$  das letzte Glied innerhalb des zeitlich betrachteten Signalfensters  $R_w$  ist und „var“ die Varianz-Funktion mit

$$V = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |X_i - \mu|^2 \quad \text{mit} \quad \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad \text{Gl. 4-3}$$

<sup>11</sup> Bezeichnung für die Ersteinsatzbestimmung der elastischen Wellen. Einzelne Ersteinsatzzeiten werden als „Picks“ bezeichnet.

bildet. Das globale Minimum der AIC-Funktion definiert schließlich die Erstankunftszeit der Kompressionswelle. Mit Kenntnis der zurückgelegten Wegstrecke  $s$  der propagierenden Ultraschallwelle kann nun die Impulsgeschwindigkeit  $c$  berechnet werden:

$$c = \frac{s}{t} \quad \text{Gl. 4-4}$$

Die Bestimmung von langsameren Wellenmoden, wie z. B. Scher- oder Oberflächenwelle, ist wesentlich komplexer und hängt sehr stark von dem zu untersuchenden Medium (z. B. Homogenität und Testkörperdimension), dem Messaufbau sowie der Risscharakteristik ab [Asadollahi et al. 2019, Godinho et al. 2013]. Meist lässt sich aufgrund des diffusen Wellenfelds und der damit verbundenen amplitudenstarken Coda bei zementgebundenen Medien keine scharfe Trennung zwischen der P-Welle sowie der darauffolgenden S- oder R-Welle im zeitbasierten Signalbild finden. Unter Berücksichtigung der Materialgesetze der Elastizitätstheorie (Kapitel 3) können schließlich mit den Erstankunftszeiten der Körperwellen auf Materialcharakteristika, wie z. B. den Elastizitäts-, Schub- und Kompressionsmodul, die Querkontraktion [Qixian et al. 1996] sowie die Betondruckfestigkeit geschlossen werden [Bogas et al. 2013, Lin et al. 2007]. Hinsichtlich der Evaluierung von Mörtel- und Betontestkörpern mit autogenen bzw. autonomen Selbstheilungseigenschaften wird in der Literatur auch ein Wiederanstieg der Schallausbreitungsgeschwindigkeit mit einer Regeneration der Materialfestigkeit und einer Heilung der zuvor ausgegangenen Mikrorisschädigung (z. B. ECC-Beton<sup>12</sup> unter Frost-Tau-Beanspruchung [Zhu et al. 2012], polymermodifizierter Beton und Druckbeanspruchung [Abd Elmoaty 2011]) in Verbindung gebracht.

Weiterführende Auswerteverfahren, welche auf der ToF-Technik basieren, sind u. a. die Schallemissionsanalyse (Kap. 4.2) oder die Ultraschalltomographie-Technik [Chai et al. 2010a, Choi et al. 2015, Haach et al. 2016, Kozlov et al. 2015, Moser 2014].

#### 4.1.2 ToFD- Verfahren

Das Time-of-Flight-Diffraction Verfahren (ToFD) kann ein praktikables Werkzeug sein, um (Vertikal-) Risse an Bauteilen zu detektieren und auch quantitativ zu charakterisieren [Liu et al. 2001, Pinto et al. 2010]. Voraussetzung ist, dass es sich dabei um oberflächennahe bzw. nicht vollständig über den Querschnitt durchgängige Risse handelt. Folglich kann bei einer indirekten Transmissionsmessung<sup>13</sup>, unter Annahme einer konstanten Schallausbreitungsgeschwindigkeit im Medium, eine Laufzeitverlängerung in die entsprechende Risstiefe umgerechnet werden. In der Literatur, als auch in zahlreichen Normen, werden verschiedene Berechnungsansätze beschrieben und diskutiert [Bungey et al. 2006, Franesqui et al. 2017, Goueygou et al. 2008, Sansalone et al. 1998, Silk 1987, Yiching et al.

---

<sup>12</sup> Engineered Cementitious Composites (ECC)

<sup>13</sup> Ankopplung von Geber- und Empfängersensor an selbiger Bauteiloberfläche (vgl. Abbildung 4-1).

1996]. In dieser Arbeit wurde für eine quantitative Bestimmung der Risstiefe, sowie deren Verfüllung und Heilung, der Ansatz nach Lin et al. (2000) mit

$$h = \sqrt{\left(\frac{(c_L^2 \cdot t_E^i)^2 + x_G^i - x_E^i}{2c_L^2 \cdot t_E^i}\right)^2} - x_G^i \quad \text{mit } i=1, 2, 3, \dots \quad \text{Gl. 4-5}$$

gewählt. Dabei ist  $t_E^i$  die gemessene Schalllaufzeit zwischen Geber- und Empfängersensor und  $x_{G/E}^i$  der direkte Abstand zwischen Riss und Sensor ist (Abbildung 4-1).

Allerdings ist die Zuverlässigkeit der quantitativen Risstiefenbestimmung sehr stark vom Messequipment sowie dessen Messkette, der Objektgeometrie, der vorliegenden Risscharakteristik und der Auswerteanalyse abhängig. Chai et al. (2010b) verdeutlicht die komplexe Einflussnahme der vorliegenden Randbedingungen auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Erstantkungszeitbestimmung. Basierend auf den Erkenntnissen aus der Literatur wurden daher Kalibriermessungen mit künstlich hergestellten vertikalen Einschnitten durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Ultraschalltechnik für den in dieser Arbeit verwendeten Messaufbau zu validieren. Abbildung 4-2 zeigt die berechneten Risstiefen „h“ unter Anwendung von Gl. 4-5 für verschiedene Geber- und Empfängerkombination. Um möglichst fehlerfreie und akkurate Erstantkungszeiten zu erhalten, wurde innerhalb des ToFD-Verfahrens auf ein automatisches Picking verzichtet und die Ankunftszeit manuell bestimmt [Kurz 2006]. Unter Berücksichtigung einer ermittelten Standardabweichung der P-Wellengeschwindigkeit ( $c_L = 4645 \text{ m/s}$ ) von 0,6% (=29 m/s) im unbeschädigten Bereich zwischen G1 und G5 liegen die Ergebnisse mit einem mittleren Fehler von 6,8 % sehr dicht an der vorhandenen Risstiefe von 0,07 m. Unterhalb des Einschnittes eingebrachte Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 6 mm zeigen offensichtlich keinen Einfluss auf die Erstantkungszeitbestimmung und beeinträchtigen schließlich auch nicht die Risstiefenbestimmung. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Sampledifferenz ( $\Delta$  Samples) und die daraus ermittelte Risstiefe keinen linearen Zusammenhang bilden (Abbildung 4-2, rechts). Geringe Risstiefen sind dadurch sehr viel stärker von der Genauigkeit der Erstantkungszeitbestimmung der P-Welle abhängig als tiefere Vertikalrisse. Diese Problematik wirkt sich besonders bei der Evaluierung von mit Polyurethan geheilten Rissen (Kapitel 6.1.2/6.2.2) aus.

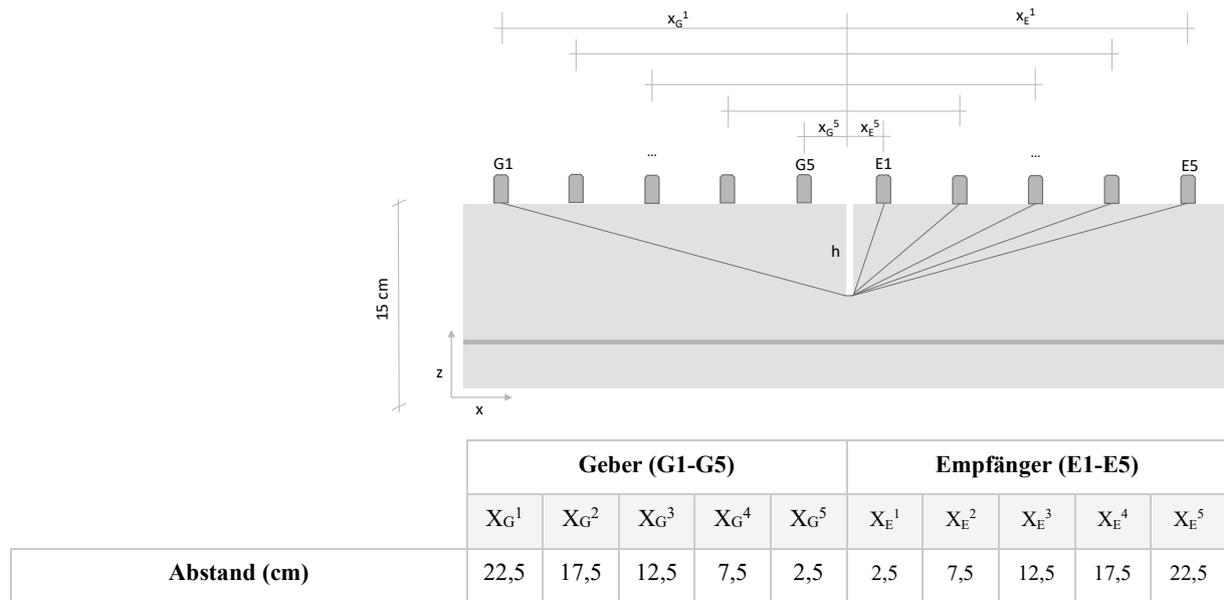


Abbildung 4-1: Geber- Empfängersensoranordnung zur Überprüfung der quantitativen Genauigkeit der Risstiefendetektion mit dem ToFD-Verfahren.

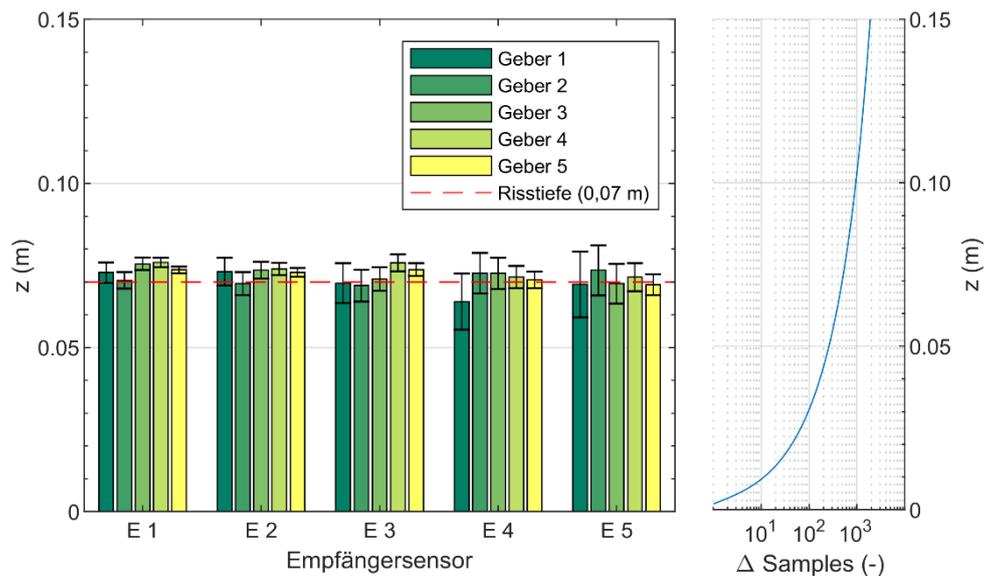


Abbildung 4-2: Quantitative Risstiefenbestimmung mit ToFD-Verfahren nach Gl. 4-5 an einem Betonbalken mit einem 6 mm breiten künstlich eingebrachten Riss. Geometrie und Zusammensetzung des Betonbalkens entsprechen der Prüferserie in Kap. 6.1. Als Geber und Empfängersensoren wurden Panametrics V103 (Firma Olympus) verwendet.

Zudem unterscheiden sich diese künstlichen Einschnitte von einem natürlichen Rissbild, z. B. resultierend aus einer 3-P-Biegebelastung. So wird ein nicht durchgängiger Riss immer spaltförmig bis an seine Risspitze verlaufen. Das Spaltende verläuft aufgrund des inhomogenen Gefüges nicht gleichmäßig und lässt sich auch nur schwer quantifizieren. Ebenfalls können neben den neu entstanden Heilungsprodukten auch Wasser, lose Sand- oder Zementpartikel sowie Gesteine, entstehend aus dem

Bruchprozess [Van Mier 2017], den Riss teilweise verfüllen und eine zusätzliche „akustische Brücke“ zwischen den Rissflanken bilden (Abbildung 4-3). Diese Effekte erzeugen eine richtungsabhängige Anisotropie innerhalb der Schallausbreitungsgeschwindigkeit und erschweren eine präzise und zuverlässige Rissbeschreibung [Ohtsu 2016, Pahlavan et al. 2018]. Numerische Modelle, welche ein möglichst reales Szenario abbilden, sollen ein besseres Verständnis der elastischen Wellenausbreitung in Festkörpern mit Risschädigungen geben [Aleshin et al. 2018, Delrue et al. 2018]. Weiterhin kann parallel zur Schallausbreitungsrichtung befindliche Stahlbewehrung die Signalausbreitung beeinflussen [Bungey et al. 2006, Liu et al. 2001]. Inwieweit sich all diese Einflussfaktoren wie Brücken, partielle Verfüllungen bzw. Reflexionserscheinungen innerhalb eines individuellen Festkörpers im Signalbild auf die Ersteinsatzbestimmung auswirken, lässt sich nicht allgemeingültig beantworten und muss daher für jeden Einzelfall validiert werden. Diesbezüglich spielt auch die Anregungsspannung [Zhao et al. 2019] und die Anregerfrequenz eine weitere wichtige Rolle. Wie auch beim ToF-Verfahren muss eine ausreichende hohe Prüffrequenz vorliegen, welche sensitiv auf die zu untersuchenden Inhomogenitäten reagieren. Alternative Rissdetektionsverfahren wie z. B. das zerstörungsfreie DIC-Verfahren<sup>14</sup> oder konventionelle Dünnschliffproben liefern nur abgeleitete Risstiefenanalysen von Veränderungen an der Bauteiloberfläche bzw. auf sehr lokal beschränkte Bereiche. Eine Erkenntnis über den Rissverlauf des gesamten Rissquerschnitts ist dadurch nicht möglich.

Um die Auflösung einer Ultraschall-Impuls-Messung quer zur Messrichtung zu verfeinern, kann mit Hilfe eines tomografischen Ansatzes [Behnia et al. 2014, Chai et al. 2010a, Choi et al. 2015, Haach et al. 2016, Moser et al. 2013, Raith et al. 2018, Schabowicz 2014] die Anzahl der Detektionspunkte erhöht werden (Abbildung 4-4). Zusätzlich ergibt sich aufgrund der multiplen Geber- und Empfängerkombinationen ein überbestimmtes Lösungssystem mit einer entsprechenden Redundanz, welches sich als Maß für eine Zuverlässigkeitsanalyse einsetzen lässt.

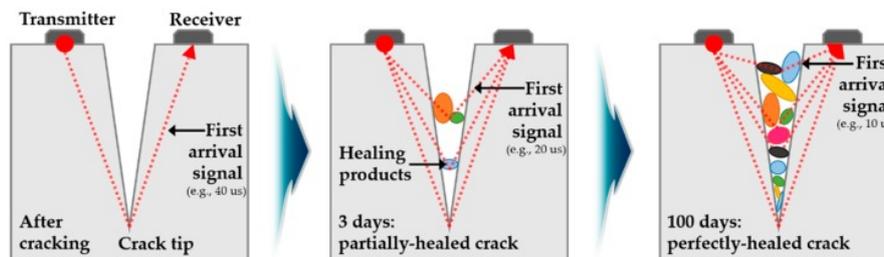


Abbildung 4-3: schemenhafte Darstellung variierender Ultraschalllaufwege während verschiedener Selbstheilungsstadien [Ahn et al. 2017].

Größter Nachteil der Risstiefenbestimmung mit dem ToFD-Verfahren ist die starke Signalschwächung der Kugelwellen, besonders des P-Wellenanteils, mit zunehmendem Laufweg im Medium (Kapitel 4.1: Mesoskopisches Frequenzband und Mehrfachstreuungsregime) und der damit verbundenen fehlerhaften Ersteinsatzbestimmung. Diesbezüglich spielt auch die Sensor-Richtcharakteristik eine entscheidende Rolle [Grosse 1996]. Die winkelabhängige Amplitudenempfindlichkeit für den in dieser Arbeit verwendeten Schallemissionssensor Panametrics V103-RB ist in Abbildung 4-15 (Kapitel 4.4)

<sup>14</sup> Digital Image Correlation (DIC)

dargestellt. Trifft die US-Welle nicht senkrecht auf die Detektionsfläche des Empfängers, so nimmt mit zunehmenden Winkel die Amplitude ab.

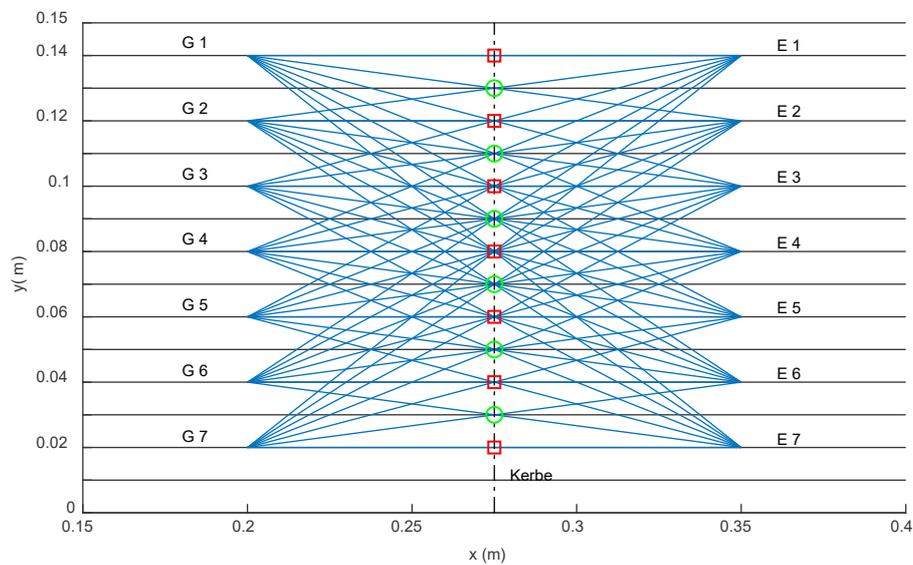


Abbildung 4-4: Tomografischer Ultraschallansatz zur Erhöhung der Auflösung der Risstiefenbestimmung mit dem ToFD-Verfahren. Darstellung entspricht dem Versuchsaufbau für Betonbalken mit „MEYCO“ in Kapitel 6.1. Rote Quadrate zeigen die Detektionspunkte einer konventionellen TOFD-Messung (B-Scan), bei der nur die Impuls-Laufzeiten der Geber (G)-Empfänger (E)-Kombination auf gleicher Linie berücksichtigt wird. Bei einem tomografischen Ansatz erhöht sich die Anzahl der Messpunkte von 7 auf insgesamt 13 (rote Quadrate + grünen Kreise).

Eine weitere Möglichkeit zur Detektion von oberflächennahen Rissen bietet die Oberflächenwellen-Technik. Rayleigh-Wellen werden weniger stark geschwächt und transponieren zugleich die meiste Energie (Kapitel 3.3). In der Literatur beschriebene Vergleichsmessungen zum ToF-Verfahren ergaben, dass aus der Oberflächenwellenanalyse abgeleitete Signalparameter wie z. B. Transmissionskoeffizient [Song et al. 2003] oder Dämpfung [Zhu et al. 2005] zwar sensitiver auf Risschädigungen und Heilungseffekte reagieren, allerdings die Zuverlässigkeit der Signalparameter durch z. B. Signalrauschen und Sensorankopplung stärker beeinträchtigt wird [Shah et al. 2000]. Eine kontaktfreie Sensorankopplung über die Luft umgeht die kontaktgebundene Ankopplungsproblematik, verstärkt aber, bedingt durch den hohen Impedanzkontrast (Kapitel 3.3), die Amplitudendämpfung. Dies gilt ebenfalls für die Verwendung von Longitudinalwellen innerhalb der Luftultraschalltechnik [Choi et al. 2015]. Desgleichen erschweren Dispersionseffekte innerhalb der Rayleigh-Wellentechnik eine Validierung der berechneten Signalparameter hinsichtlich einer quantitativen Rissanalyse. Einen detaillierten Überblick zu diesem Thema gibt u. a. In et al. (2014), Kim et al. (2014), Lee et al. (2016), Popovics et al. (2010), Shin et al. (2008), Shiotani et al. (2007), Thiele et al. (2014), Zhu et al. (2005), Chen et al. (2018).

### 4.1.3 In-situ-Messung: Monitoring der Rissbildung und autonomen Heilung

Die Ultraschall-Technik kann vereinzelt zu bestimmten Zeitpunkten oder kontinuierlich mit einer bestimmten Wiederholungsfrequenz angewandt werden. Dabei wird die über einen gewissen Zeitraum kontinuierliche Überwachung (Monitoring) des Materialverhaltens mit transienten elastischen Wellen als In-situ-Messung bezeichnet. Ursprünglich eingesetzt zum Monitoring des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens von zementgebundenen Werkstoffen [Boulay et al. 2013, Carette et al. 2016, Krüger et al. 2013, Krüger et al. 2011], kann dieses Verfahren auch unterschiedliche spannungsbelastende Material- und Schädigungsbeanspruchungen [Rucka et al. 2013, Zhao et al. 2018] erfassen. Folglich sollte sich auch das Verfüll- und Aushärteverhalten von Mörtel- und Betontestkörpern mit polyurethanbasierten Selbstheilungseigenschaften zeitlich erfassen lassen (Kapitel 5.2/6.1.3/6.2.3). Wird davon ausgegangen, dass mit zunehmender Aushärtung des zu Beginn flüssigen Polyurethans eine zunehmende Schallwellenübertragung des Scherwellenanteils stattfindet, sollten Transversalwellensensoren eine signifikantere Signalveränderung detektieren [Chung et al. 2009, Voigt et al. 2005].

In Abhängigkeit der Messfrequenz können neben der Ersteinsatzbestimmung (ToF) auch jegliche weitere Auswerteparameter (z. B. Amplitude, Frequenz, Energie, etc.) aus der Ultraschalltechnik verwendet werden. Darüber hinaus bieten Auto- bzw. Kreuzkorrelationstechniken<sup>15</sup> eine Systemanalyse zwischen einzelnen Zeitreihen.

Um ein an das Belastungsszenario angepasstes Zeitaufklärungsvermögen zu erhalten, werden meist kurze Burstsignale<sup>16</sup> mit hohen zeitlichen Wiederholraten erzeugt. Dies stellt aufgrund der starken Schallschwächung in zementhaltigen Werkstoffen eine besondere Anforderung an das benötigte elektronische Equipment wie Ultraschallwandler, Messverstärker und A/D-Wandler.

Beim Messaufbau ist darauf zu achten, dass bei Verwendung von Kontaktsensoren eine kontinuierlich gleichbleibende Sensorankopplung vorhanden ist. Ansonsten besteht die Gefahr, dass die induzierten Impulse durch akustische Impedanzveränderungen während der Messung lang- oder kurzfristig die Schallentwicklung im Testobjekt beeinflussen [Chaston et al. 2008]. Diese Problematik kann z. B. durch eingebettete piezoelektrische Wandler in die Betonmatrix umgangen werden. Allerdings erfordert die dauerhafte Integration oder oberflächliche Anbringung von aktiven Überwachungssystemen möglichst kleine und dennoch effiziente piezoelektrische Wandler. Da die eingebetteten Sensoren nicht wiederverwendbar sind, müssen diese zugleich verhältnismäßig kostengünstig sein. Erste Entwicklungsansätze solcher Komponenten und Methoden für ein US-Monitoring in zementgebundenen Werkstoffen mit und ohne Selbstheilungseigenschaften sind in Cédric et al. (2017), Dumoulin et al. (2016), Dumoulin et al. (2017), Niederleithinger et al. (2015), Quinn et al. (2012), Song et al. (2007), Tsangouri et al. (2015) aufgezeigt.

---

<sup>15</sup> Definition in Natke (1988)

<sup>16</sup> Burstsignale: periodisch begrenzter Schallimpuls

Da die Untersuchung von Schädigungsprozessen in dieser Arbeit mit Hilfe von leistungsstarken Druck- und Biegeprüfmaschinen durchgeführt wurde, musste mit akustischen (z. B. niederfrequente Schwingungen) und elektromagnetischen (z. B. Rauschen) Störeinflüssen gerechnet werden, welche die Datenqualität erheblich reduzieren können. Eine optimierte Signalkonditionierung (z. B. analoge und digitale Verstärkung, Dämpfung, Filterung) spielte daher eine wichtige Rolle für die weitere Signalverarbeitung [Hussain et al. 2011, Oppenheim et al. 2014].

Gleiches gilt bei Messvorgängen über einen längeren Zeitraum, bei denen ebenfalls äußere Umgebungseinflüsse (z. B. Schwankungen der Umgebungstemperatur, Umgebungsfeuchte) oder stationäre Störungen zu einer Veränderung des Signalbilds führen, mit der Folge einer Fehlinterpretation der Messdaten [Croxford et al. 2010, Marzani et al. 2012, Zhang et al. 2017]. Daher sind geräte- und umgebungsspezifische Kalibriermessungen für aussagekräftige Datenauswertungen notwendig [Zhang et al. 2012]. Chaston et al. (2008) und Stuber Geesey et al. (2019) zeigten beispielsweise, dass das Langzeit-Ankoppelverhalten von piezoelektrischen Sensoren aufgrund der Aushärtung und kontinuierlichen Alterung des Ankopplmittels einen erheblichen Einfluss auf die Ultraschallmessungen haben kann. Daher wurden im Vorfeld Referenzmessung zur Evaluierung des Langzeit-Signalverhaltens für das In-situ-Verfahren durchgeführt. Direkte US-Transmissionsmessungen an einem ungerissenen Betontestkörper (Kapitel 6.2) sollten Aufschluss über das Langzeit-Signalverhalten bei einer Sensorankopplung mit Heißkleber geben. Der Testkörper sowie das Messequipment wurden in einer Klimakammer mit 20 °C und 65 % rel. LF gelagert, um möglichst stabile Umgebungsbedingungen zu gewährleisten.

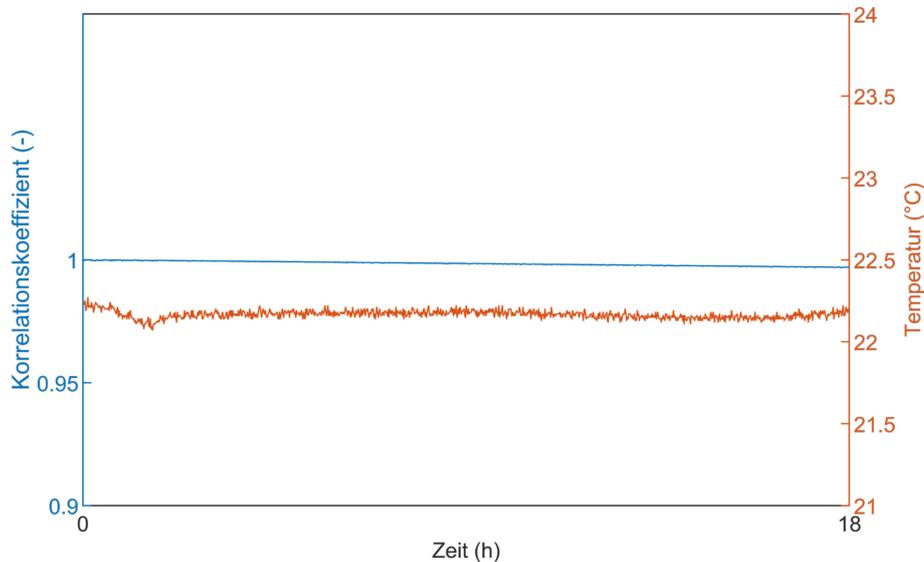


Abbildung 4-5: Ultraschall In-situ-Kalibriermessung in Transmission mit Olympus Panametrics V150-RB Sensoren an Betontestkörper aus Kapitel 6.2 (400 x 150 x 100 mm) über 18 h in Klimakammer (20 °C, 65 % rel. Feuchte).

Abbildung 4-5 zeigt den Korrelationskoeffizienten, welcher die statistische Abhängigkeit zweier Variablen impliziert, der Ultraschallsignale (Signallänge: 1,1 ms) während einer kontinuierlichen Ultraschallmessung (1 Puls/min) über einen Zeitraum von 18 Stunden. Der Korrelationskoeffizient hat sich bereits zahlreich als geeignetes Instrument zur Detektion und Visualisierung von

belastungsbedingten Szenarios erwiesen [Hadziioannou et al. 2009, Larose et al. 2009, Molyneux et al. 1999, Niederleithinger et al. 2015]. Da bei der Bestimmung des Korrelationskoeffizienten die vollständigen Signalwellenformen miteinander verglichen werden, kann dies selbst kleinste spannungsbasierte Material- bzw. Strukturveränderungen detektieren (vgl. Gl. 3-33-Gl. 3-35). Der Verlauf über die vollständige Messdauer ist mit einer maximalen Koeffizientendifferenz von  $\pm 0,0032$  nahezu konstant. Die minimalen Schwankungen im Temperaturverlauf zeigen keine Korrelation zum Koeffizientenverlauf und können somit vernachlässigt werden. Darauf aufbauend, sowie unter Berücksichtigung der Ersteinsatz- und amplitudenabhängigen Ankopplungs- und Richtproblematik bei Kontaktsensoren (Kapitel 4.1.1/4.4), wurde innerhalb der polyurethanbasierten Rissverschleißung für die Analyse der Verfüll- und Aushärtecharakteristika vorwiegend der Korrelationskoeffizient herangezogen.

## 4.2 Schallemissionsanalyse

Kommt es zu mikrostrukturellen Veränderungen oder Reibungsprozessen in spannungsbelasteten Medien, werden Schallemissionen (SE) emittiert, welche sich in einem homogenen Medium als elastische Raumwellen konzentrisch ausbreiten. Die Schallemissionstechnik erfasst die elastischen Wellen, zeichnet sie auf und ermöglicht eine Charakterisierung des Schadenbilds. So können aus diesen Signalen Rückschlüsse auf die Ursache der Verformung und den Zustand des Materials gezogen werden. Die Wellenbildung wird also durch mikroskopische Bewegungen innerhalb des Objekts verursacht und nicht durch räumliche Diskontinuitätspunkte. Diese Eigenschaft macht die Schallemissionsanalyse zum einzigen zerstörungsfreien Prüfverfahren, welches in Echtzeit passiv ein Materialversagen mit irreversiblen Deformationen registrieren kann. Daher wird diese Untersuchungsmethode in vielen Bereichen des Ingenieurwesens, der Materialwissenschaften und Geowissenschaft zur Erkennung von (frühzeitigen) Schadensbildern, der Materialcharakterisierung und dauerhaften Bauwerksüberwachung eingesetzt. Für den Anwendungsbereich der Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Bruchprozessen zementgebundener Werkstoffen liefern u. a. Grosse et al. (2008) und Ohtsu (2015) eine detaillierte Beschreibung der Messtechnik und Datenanalyse. Da die Schallemissionen und schließlich auch die elastische Wellenausbreitung an die unterschiedlichen Betonzusammensetzungen bzw. -Rezepturen und mechanischen Beanspruchungen gekoppelt sind, existieren Studien mit unterschiedlichsten Kombinationen aus Auswerteparametern und spezialisierten Anwendungsfällen. Ein Ableiten und Übertragen von Messergebnissen auf unterschiedlich durchgeführte Studien oder Materialien ist daher nur bedingt möglich und erfordert eine umfangreiche Expertise der vollständigen Messkette. Innerhalb der Untersuchung von Beton mit kapillarbasierten Selbstheilungseigenschaften, mit dem Ziel eines kraftschlüssigen Rissverbundes, konnten u. a. Van Tittelboom et al. (2012), Tsangouri et al. (2013) und Karaiskos et al. (2016) zeigen, dass SE-Ereignisse mit Kapselbrüchen während des Bruchfortschritts aufgrund eines 3-Punkt-Biegeversuchs verbunden sind. Mittels einer parameterbasierten Energiebetrachtung der SE-Ereignisse lassen sich Kapselbrüche von der Rissbildung ansatzweise unterscheiden. Ebenfalls zeigen Van Tittelboom et al. (2012) und Granger et al. (2007), dass nach einer weiteren Wiederbelastung zusätzliche Kapselbrüche bzw. neuartige SE auftreten, welche auf eine autonome Rissverschleißung zurückzuführen sind. Um solch eine Segmentierung der Emissionen vornehmen zu können, ist zunächst eine Validierung des Zusammenhangs zwischen den

SE-Ergebnissen und dem Schädigungsszenario erforderlich. Dies kann z. B. über einen Abgleich der SE-Lokalisierungsergebnisse mit der Kenntnis der einzelnen Positionen der Kapillaren bzw. Kapseln im zu untersuchenden Objekt oder durch Vergleichsmessungen mit materialgleichen Referenztestkörpern erfolgen [Minnebo et al. 2017, Van Tittelboom et al. 2015]. Weitere alternative Prüfverfahren wie z. B. digitale Bildkorrelation (DIC) oder Computertomografie (CT) sowie numerische Simulationsanalysen ermöglichen eine zusätzliche Verifizierung [Feiteira et al. 2017, Omondi et al. 2016, Rodríguez et al. 2019, Savija et al. 2015].

Um die quantitative Beurteilung einer erfolgreichen Selbstheilung mit polyurethangefüllten Glaskapillaren zu verfeinern, liegt der Fokus in dieser Arbeit auf der Lokalisierung der detektierten SE. Erst mit der lokalen Zuordnung und Separierung einzelner Bruchmechanismen besteht die Möglichkeit, das komplexe Verhalten der autonomen Selbstheilung in Betonbauteilen zu charakterisieren. Wichtigster Parameter für eine erfolgreiche Lokalisierung der SE ist die Ankunftszeitbestimmung der P-Welle an jedem SE-Sensor. Um die materialbedingten Signaldämpfungseffekte zu kompensieren und das S/N-Verhältnis zu verbessern, wurde das analoge Empfängersignal auf ein Maximum vorverstärkt. Dieses Vorgehen hat allerdings den Nachteil, dass es bei Überschreitung der Eingangssignalspannung zu einem Übersteuern bzw. Clipping<sup>17</sup> der aufgezeichneten Signalform kommt. Der daraus resultierende Informationsverlust ist nicht reproduzierbar und behindert eine Vielzahl an hauptsächlich frequenzbasierten Auswerteverfahren, wie z. B. die Momenten-Tensor-Inversion [Grosse et al. 2006]. Da eine kontinuierliche Datenaufzeichnung ohne aktive SE-Triggenung noch mit den zur Verfügung stehenden technischen Mitteln an der Umsetzung scheitert, muss ein Kompromiss aus Abtastrate, Aufzeichnungslänge, Triggerschwellwert und Triggerintervall gewählt werden. Diese messgerätespezifischen Einstellungen müssen, bedingt durch die wechselnden Randbedingungen, für jeden Versuchsaufbau kontrolliert und gegebenenfalls neu angepasst werden. Dies kann zu einer erheblichen Beeinflussung der Datenerhebung führen und folglich auch die zu vergleichenden Dateninterpretationen erschweren.

### Messprinzip

Neben der parameterbasierten Darstellung der Messdaten ist die Lokalisierung der SE-Quellen eine der wichtigsten Aufgaben der Schallemissionsanalyse. In Abhängigkeit des Messaufbaus und der Testkörpergeometrie wurden zur Untersuchung von zementgebundenen Werkstoffen mittlerweile zahlreiche Lokisierungsalgorithmen auf Basis von z. B. Beamforming [McLaskey et al. 2010b], multilinearen Wellenpfaden [Gollob et al. 2017], linearen Optimierungsverfahren, Vernetzungsalgorithmen [Sbartai et al. 2015] oder Dekonvolutionstechniken [Kocur 2017] entwickelt. Eine Übersicht zu weiteren Lokisierungsverfahren, welche bei allgemeinen SE-Laborexperimenten eingesetzt werden, ist in Ge (2003a, 2003b) und Kundu (2013) gegeben.

---

<sup>17</sup> aus dem engl.: Abschneiden der Signalausschläge, welche über den Eingangsbereich des Messverstärkers hinausgehen.

Die in dieser Arbeit angewandten Lokalisierungsalgorithmen nach Geiger (1910) und Bancroft (1985) basieren auf der Entwicklung aus der Seismologie sowie des Global Positioning Systems (GPS) und stellen ein inverses Lösungsproblem dar. Über die Differenzen von vier Ankunftszeiten (ToF-Verfahren) einer elastischen Welle zu jedem Sensor lässt sich das Hypozentrum und die Herdzeit der Schallemission im dreidimensionalen Raum berechnen. Während in der Seismologie meist die Erstankunftszeiten von P- und S-Welle für eine präzisere Ortung verwendet werden, kann bei der SEA infolge der verkürzten Signallaufwege und der Nahfeldeffekte meist keine klare Trennung der Raumwellen erfolgen [Kurz et al. 2008].

Da heutzutage fast unlimitierte Datenspeicherplatzmöglichkeiten und ausreichend schnelle Rechenkapazitäten vorhanden sind, bietet die signalbasierte Aufzeichnungsmethode gegenüber der parameterbasierten, der Abspeicherung von einzelnen festgelegten Signalparametern (z. B. Erstankunftszeit, Maximalamplitude, Energie, etc.), mehr Möglichkeiten. Durch die Abspeicherung der vollständigen Rohdaten lassen sich die Signale nachträglich im Postprocessing bearbeiten, überprüfen und zusätzliche Informationen, z. B. über das Frequenzverhalten, gewinnen [Grosse et al. 2003]. Besonders die automatische Erstankunftszeitbestimmung mittels dem autoregressivem AIC-Picker (Kapitel 4.1.1) hängt sehr stark vom S/N-Verhältnis und der individuellen Sensorcharakteristik ab (Kapitel 4.4). Auch hier lässt sich mit geeigneten Werkzeugen im Postprocessing, wie z. B. Wavelet-Filtern, eine Verbesserung der Ergebnisse erzielen [Grosse et al. 2002, Wijaya et al. 2014]. Um die Rissstruktur, das Triggern der Kapillarbrüche und die anschließende kraftschlüssige Selbstheilung zu evaluieren, wurden die Lokalisierungsalgorithmen nach Geiger (1910) und Bancroft (1985) angewandt. Dabei wird dem Berechnungsansatz zugrunde gelegt, dass jede Schallemission einer Punktquelle entspringt und dass eine konstant homogene Schallausbreitungsgeschwindigkeitsverteilung im Medium vorliegt. Damit lässt sich folgendes nichtlineares Gleichungssystem definieren [Raith 2013]:

$$t_{a,i} = t_0 + \frac{1}{c} \cdot \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}, \quad \text{Gl. 4-6}$$

wobei  $t_{a,i}$  die gemessene Ankunftszeit am Sensor  $i$  mit den Koordinaten  $(x_i, y_i, z_i)$  und  $t_0$  die unbekannte Herdzeit der Schallemission mit den Hypozentrumkoordinaten  $(x_0, y_0, z_0)$  definiert. Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  wird im Vorfeld z. B. über Ultraschallmessungen ermittelt. Um eine über das Prüfobjekt homogene und repräsentative Schallausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  zu erhalten, wurde die P-Wellengeschwindigkeit mittels Regressionsausgleichsgeraden über eine Vielzahl von Messpunkten mit US-Impulsen an der Testkörperoberfläche bestimmt [Köppel 2002, Raith 2013]. Diese Methode ermöglicht die Bestimmung einer detaillierten Geschwindigkeitsverteilung mit Berücksichtigung und Erkennung systematischer Fehler (z. B. Totzeit und fehlerhafte Sensorplatzierung).

Abbildung 4-6 zeigt das zu Gl. 4-6 entsprechende theoretische Modell mit einer generischen Anzahl an Sensoren, welche auf Basis einer homogenen Materialstruktur mit einem gradlinigen Wellenweg zur Emissionsquelle verbunden sind. Unter Berücksichtigung der Annahme, dass die Wellenlänge (Gl. 4-1) größer ist als der für Betonrezepturen typische Größtkorndurchmesser von 16 (32) mm, kann folglich

von einem homogenen Geschwindigkeitsfeld ausgegangen werden [Ohtsu 2015]. Mit der Verwendung einer erhöhten Anzahl an SE-Sensoren lässt sich ein überbestimmtes Gleichungssystem erzielen, womit die Lokalisierungsgenauigkeit verbessert werden kann. Kann abgeschätzt werden, in welchem Bereich die Schallemissionen auftreten werden, sollte zudem eine gleichmäßige Sensorabdeckung um diesen Ort angestrebt werden [Köppel 2002, Meo 2014].

Im Folgenden werden die Grundprinzipien sowie die zur Berechnung implementierten Lokalisierungsalgorithmen der angewandten Verfahren in ihren wesentlichen Aspekten beschrieben und diskutiert.

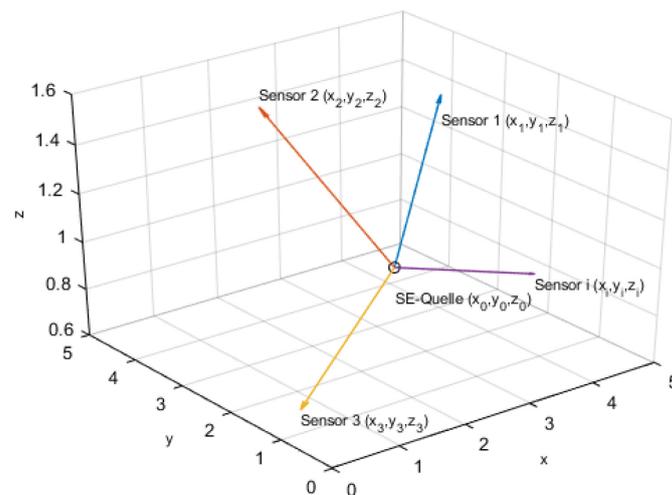


Abbildung 4-6: Theoretisches Modell zur Bestimmung einer Schallemissionsquelle mit  $i$  Sensoren.

#### 4.2.1 Geiger-Methode

Die Methode nach Geiger (1910) ist das am häufigsten vertretene Lokalisierungsverfahren in der SEA und basiert auf einem iterativen Lösungsverfahren unter Anwendung des kleinsten Fehlerquadrates. Eine Linearisierung von Gl. 4-6 mittels Taylor-Entwicklung ermöglicht das Aufstellen eines linearen Gleichungssystems zur Berechnung des Herdvektors  $x = (x, y, z, t)^T$ . Neben der Bestimmung der Ankunftszeiten wird für eine Konvergenz des Gleichungssystems ein geschätzter Ausgangsvektor  $x_0$  mit den Startwertparametern in der Nähe der unbekanntenen Herdkoordinaten  $x, y, z$  und der Herdzeit  $t$  benötigt. Ausgehend vom Taylor-Polynom ersten Grades mit  $i$ -Sensoren:

$$f_i(x) = f_i(x_0 + \delta x) = f_i(x_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f_i}{\partial y} \delta y + \frac{\partial f_i}{\partial z} \delta z + \frac{\partial f_i}{\partial t} \delta t \quad \text{Gl. 4-7}$$

mit

$$x_0 = (x_0, y_0, z_0, t_0)^T \quad \text{und dem Korrekturfaktor} \quad \delta x = (\delta x, \delta y, \delta z, \delta t)^T.$$

ergibt sich folgende Matrix-Notation:

$$\mathbf{A}\delta x = \boldsymbol{\gamma} \quad \text{Gl. 4-8}$$

mit

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial x} & \frac{\partial f_i}{\partial y} & \frac{\partial f_i}{\partial z} & \frac{\partial f_i}{\partial t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x} & \frac{\partial f_m}{\partial y} & \frac{\partial f_m}{\partial z} & \frac{\partial f_m}{\partial t} \end{bmatrix}, \quad \delta x = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \\ \delta t \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} \gamma_i \\ \vdots \\ \gamma_m \end{bmatrix}. \quad \text{Gl. 4-9}$$

$\boldsymbol{\gamma}$  bezeichnet dabei die einzelnen Kanalresiduen mit

$$\boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} t_{a,i} - t_{c,i} \\ \vdots \\ t_{a,m} - t_{c,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i(x) - f_i(x_0) \\ \vdots \\ f_m(x) - f_m(x_0) \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 4-10}$$

wobei  $t_{a,i}$  die beobachtete Ankunftszeit am Sensor  $i$  ist und  $t_{c,i}$  die berechnete Ankunftszeit sowie zusätzlich die Herdzeit des geschätzten Ausgangsvektors  $x_0$  beinhaltet.

Der Korrekturfaktor lässt sich mittels Invertierungsverfahren lösen:

$$\delta x = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \boldsymbol{\gamma} \quad \text{Gl. 4-11}$$

und der korrigierte Lokalisierungsvektor  $x_{0,corr}$  ergibt sich für den nächsten Iterationsschritt zu:

$$x_{0,corr} = x_0 + \delta x \quad \text{Gl. 4-12}$$

Unter der Annahme einer Konvergenz, wodurch die Iterationsabfolge ins Unendliche verlaufen würde, ist ein Abbruchkriterium notwendig. Gleiches gilt für den Fall einer Divergenz. Diese Problematik lässt sich sowohl über eine Beschränkung der Iterationsschritte als auch über eine Begrenzung der räumlichen Komponenten des Korrekturwertes lösen. Tritt eines der beiden Kriterien während der Iterationsfolge ein, ist durch Einsetzen von  $x_{0,corr}$  in Gl. 4-6 die bestmögliche Ausgleichsrechnung erzielt worden. Zudem lassen sich Ankunftszeiten, welche während des Iterationsprozesses nicht zu einer Verminderung des Korrekturvektors führen, herausfiltern, sodass dies bis zu einem gewissen Grad das

Ergebnis optimieren kann. Über einen Vergleich zwischen den Kanalresiduen aus Gl. 4-10 ist eine statistische Fehleranalyse des Lokalisierungsergebnisses mit

$$RES = \sqrt{\frac{\gamma^T \gamma}{m - 4}} \quad \text{mit } m: \text{ Anzahl an Gleichungen (vgl. Gl. 4-7)} \quad \text{Gl. 4-13}$$

berechenbar [Ge 2003b]. Allerdings folgt dieser Ansatz der  $L^2$ -Norm und ist aus mathematischer Sicht nur bei einer Normalverteilung der Eingangswerte gültig. Treten große Residuen an wenigen Kanälen auf, so ist meist diese Annahme nicht mehr gültig. Allerdings lassen sich aus den einzelnen Kanalresiduen und den Sensorpositionen die maximalen Ortungsfehler je Koordinatenachse oder der euklidische Abstand bestimmen, was eine sehr konservative Fehlerabschätzung ist. Aufgrund einzelner Ausreißer oder systematischer Fehler kann dies zu sehr großen Werten führen. Sind diese Werte jedoch so klein, dass eine räumliche Differenzierung zwischen einzelnen SE-Events noch getroffen werden kann oder ein Clustern möglich ist, desto aussagekräftiger ist die Dateninterpretation.

#### 4.2.2 Bancroft-Methode

Die Lokalisierungsmethode nach Bancroft (1985) basiert auf einem direkten algebraischem Lösungsansatz und wurde ursprünglich für die GPS Positionsbestimmung eingesetzt. Im Gegensatz zum Geiger-Verfahren etablierte sich der Bancroft-Algorithmus erst seit wenigen Jahren in der SEA und wurde erstmals durch Kurz [Kurz 2015, Kurz 2006] ausführlich beschrieben und mit anderen Lokalisierungsverfahren verglichen. Unter Zuhilfenahme des Permutationsansatzes für überbestimmte Gleichungssysteme konnte für große Betontestkörper geschlussfolgert werden, dass das direkte Verfahren numerisch stabiler, weniger zeitintensiv und bei fehlerhaften Ersteinsatzzeiten weitaus zuverlässigere Ergebnisse liefert als das iterative Geiger-Verfahren. Da innerhalb der Versuchsdurchführung zur Evaluierung der Selbstheilungseffizienz die SEA an bereits vorgeschädigten Testkörpern angewandt wird, ist aufgrund der stark anisotropen Materialstruktur mit zunehmend gestörten und inhomogenen Schalllaufwegen zu rechnen. Dies erhöht u. a. die Signalschwächung, führt zu einer komplexen Schallwellenausbreitung und erschwert folglich die Lokalisierung. Während das Bancroft-Verfahren unter diesen Umständen noch Lösungsergebnisse liefert, führt dies bei iterativen Verfahren zu einer verstärkten Divergenz. Zusätzlich ermöglicht der Permutationsansatz, ähnlich zum Geiger-Verfahren, eine Filterung von einzeln stark abweichenden Ankunftszeiten, sodass diese im weiterführenden Lokalisierungsverfahren nicht berücksichtigt werden.

Das auf einem quadratischen Ansatz beruhende nichtlineare Gleichungssystem führt über

$$x_{1,2} = \frac{1}{2} MB^{-1}(a + \lambda_{1,2} \cdot e) \quad \text{Gl. 4-14}$$

zu zwei Lösungen.

Die Matrizen  $\mathbf{M}$  und  $\mathbf{B}$  sind definiert zu:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & -1 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad B = \begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i & \rho_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & y_m & z_m & \rho_m \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} s_i^T \\ \vdots \\ s_m^T \end{pmatrix},$$

wobei  $\rho_i = c \cdot t_{a,i}$  als Pseudodistanz definiert ist.

$\lambda_{1,2}$  löst sich mit den Koeffizienten

$$\alpha_2 = \langle B^{-1}e, B^{-1}e \rangle_L, \quad \alpha_1 = \langle B^{-1}a, B^{-1}e \rangle_L - 2, \quad \alpha_0 = \langle B^{-1}a, B^{-1}a \rangle_L \quad \text{Gl. 4-15}$$

unter Anwendung des Lorentz-Produkts im  $\mathbb{R}^4$ .

In  $a$  sind wiederum die Sensorpositionen und Pseudodistanzen enthalten:

$$a = \begin{pmatrix} \langle s_i, s_i \rangle_L \\ \vdots \\ \langle s_m, s_m \rangle_L \end{pmatrix}, \quad \alpha_1 = \langle B^{-1}a, B^{-1}e \rangle_L - 2, \quad \alpha_0 = \langle B^{-1}a, B^{-1}a \rangle_L, \quad \text{Gl. 4-16}$$

wobei  $e$  der Einheitsvektor im  $\mathbb{R}^4$  ist.

Die Abschätzung, welche der zwei Lösungen von  $x_{1,2}$  die relevante ist, kann im Idealfall über eine versuchsbedingte Plausibilitätsprüfung abgewogen werden. Allerdings ist nicht ausgeschlossen, dass bei einer zufälligen Kombination entscheidender Einflussfaktoren die Ergebnisse sehr dicht beieinanderliegen und eine Abschätzung schwierig wird.

Bei Verwendung eines bestimmten Gleichungssystems ist eine Fehlerangabe infolge von Residuen nicht möglich. Ist das System mit steigender Anzahl an applizierten Sensoren überbestimmt, lässt sich, parallel zum Geiger-Verfahren, eine Fehlerrechnung durchführen. Wird jedoch ein Permutationsansatz verfolgt, welcher eine vielfache Menge an Lösungen für ein SE-Event erzeugt, muss zunächst über eine Plausibilisierung, z. B. über statistische Analyseverfahren, eine eindeutige Lösung ermittelt werden. Im Idealfall, also mit fehlerfreien Ersteinsätzen, geradlinigen Schalllaufwegen und Punktkontaktsensoren, würden die Einzellokalisierungsergebnisse im dreidimensionalen Raum auf ein infinitesimal kleines Volumen zusammenschrumpfen und eine eindeutige Lösung widerspiegeln. Da dies nur selten der Fall ist, nimmt in Abhängigkeit der fehlerhaften Ankunftszeiten das Volumen der Punktwolke zu. Um Lokalisierungsaußreißer im Vorfeld auszuwählen, wurde ähnlich nach Kurz (2006), eine Limitierung der zu erwartenden Längendifferenzen je Koordinatenrichtung um den Median eingeführt. Die anschließende Bildung des Massenschwerpunktes aus den einzelnen Permutationsergebnissen, welcher innerhalb des zuvor beschränkten Raumes liegen, ergibt schließlich das finale Lokalisierungsergebnis. Nun ist es möglich, eine Fehlerrechnung über die Residuen der definierten Lösungen mit den

Pseudodistanzen zu den einzelnen Sensorpunkten nach Gl. 4-13 durchzuführen. Da jedoch beim Bancroft-Verfahren ein Herausfiltern einzelner inkonsistenter Ersteinsätze über alle Permutationen nicht immer möglich ist, werden die daraus sich ergebenden relativ großen Kanalresiduen bei der Fehleranalyse weiterhin berücksichtigt. So können sich trotz sehr dicht beieinanderliegender Lokalisierungsergebnisse beider Verfahren, die Fehlerangaben dennoch stark voneinander unterscheiden. Daher ist es schwierig eine qualitative Beurteilung der unterschiedlichen Algorithmen nach Geiger (1910) und Bancroft (1985) mit Permutationsansatz über die Lokalisierungsgenauigkeit abzugeben. Allerdings hat sich in Voruntersuchungen ein Szenario gebildet, bei dem der manuell implementierte Bancroft-Algorithmus dem Geiger-Verfahren überlegen ist. Kommt es aufgrund von Ablöseeffekten oder Messsystemfehlern zu durchgehend fehlerhaften Ankunftszeitbestimmungen einzelner Sensoren, lassen sich diese über die singulären Permutationsergebnisse detektieren und aus der Berechnung gezielt ausschließen. Innerhalb des Geiger-Verfahrens führen diese fehlerhaften Ersteinsätze teilweise zu Divergenzen. In Appendix A ist ein Vergleich der verwendeten Lokisierungsalgorithmen mit synthetisch generierten Signallaufzeiten gezeigt, bei dem zwei SE-Sensoren stark fehlerhafte Ersteinsätze aufweisen.

### 4.3 Schwingungsanalyse

Die Schwingungsanalyse ermöglicht die experimentelle Bestimmung der Eigen- bzw. Resonanzfrequenzen des Gesamtsystems. Aus den Schwingungseigenschaften, welche sich maßgeblich auf den Niederfrequenzbereich beschränken, lassen sich strukturelle (z. B. Masse, Elastizitätsmodul, Dämpfung) wie auch modale Parameter (z. B. Modalfrequenzen, Eigenschwingformen) beschreiben. Kommt es zu einer Veränderung der dynamischen Materialeigenschaften, lassen sich diese auf Veränderungen in den Material- und Struktureigenschaften oder auf eine Schädigung zurückführen [Pandey et al. 1994]. Im Gegensatz zu einer vollständigen Modalanalyse, welche die elastischen Parameter über eine Vielzahl an Messknoten am Objekt bestimmt, werden bei einer Schwingungsanalyse nur die Eigenfrequenzen erfasst. Je größer dabei die Veränderungen vom Ausgangszustand sind, desto stärker ist auch die Frequenzänderung [Grosse 2011]. Dies macht die Verwendung der Eigenfrequenz zu einem geeigneten Diagnosetool für eine schnelle und kostengünstige Überwachung einzelner Bauteile bzw. ganzer Bauwerke. Als größter Nachteil der Schwingungsanalyse kann die fehlende Lokalisierung einer lokalen strukturellen Schädigung genannt werden. Da immer die globale Struktur angeregt wird, ist eine quantitative Beurteilung der Schädigung ohne zusätzliche Referenzverfahren nicht ohne weiteres möglich [Boukria et al. 2012a, Salawu 1997].

Zur Bestimmung der dynamischen Materialeigenschaften von strukturell homogenen Testkörpern hat die Schwingungsanalyse einige Vorteile gegenüber statischen Verfahren. So müssen beispielsweise für die Berechnung der elastischen Konstanten keine hohen Spannungen und Drücke aufgewendet werden, um die notwendigen Dehnungen hervorzurufen. Zudem werden anelastische Prozesse, wie z. B. Kriechverformungen, vermieden. Somit lassen sich am selbigen Objekt wiederholende Messungen ohne bleibende Schäden durchführen. Um jedoch zuverlässige und aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, welche sich mit den Resultaten weiterer zerstörungsfreier Prüfverfahren wie z. B. Ultraschall oder mit denen aus der zerstörenden Prüfung decken, müssen zunächst sämtliche Einflussfaktoren der Messkette

analysiert werden. Ebenso ist es häufig schwer abzuschätzen, wie sensitiv die Schwingungsanalyse auf mikrostrukturelle Veränderungen durch z. B. Variation der Zusatzstoffe, Additive oder den Aushärteprozess reagiert. Dazu wurden bereits zahlreiche empirische und auch numerische Studien mit unterschiedlich individuellen Versuchsaufbauten von u. a. Aguilar et al. (2016), Boileau et al. (1981), Boulay et al. (2013), Eiras et al. (2015), Hassan et al. (2012), Ito et al. (1997), Jurowski et al. (2015), Musiał et al. (2016), Popovics (1975), Shah et al. (2000) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine allgemeingültige Übertragung oder Umrechnung der harmonischen Eigenfrequenzen nicht immer mit den etablierten Kennwerten (z. B. Poisson-Zahl, Druckfestigkeit, etc.) korrelieren bzw. die Sensitivität zur Erfassung der Veränderungen nicht ausreichend ist. Aus der Berechnung der Eigenschwingungen lässt sich auch die dazugehörige Dämpfung ableiten, welche ein wesentlich empfindlicherer Parameter ist, aber zugleich auch die Ungenauigkeit erhöht [Cao et al. 2017].

Für die Evaluierung der Selbstheilungseigenschaften mit Bakterien und Hydrogelen sind besonders Langzeituntersuchungen mit zyklisch wechselnden Expositionen relevant. Mit Studien u. a. von Ohtsu (2011), Boukria et al. (2012b) und [Kessler et al. 2016] konnte belegt werden, dass die Schwingungsanalyse geeignete Auswerteparameter liefert, welche die Frost-Tau-Beanspruchung oder das Langzeitverhalten eines Nass-Trockenzyklus mit unterschiedlichen Porositäten von Mörtel- bzw. Betontestkörpern abbilden. Ebenso finden sich in Daniel et al. (2001) und Yang et al. (2009) zuversichtliche Ansätze einer Beurteilung von autogenen Selbstheilungseffekten von Mikroschädigungen bei ultrahochfestem Beton (UHPC) und Asphaltbeton.

Diese Grundlagen und Erkenntnisse bilden eine erfolgsversprechende Basis für die Implementierung der Schwingungsanalyse zur Beurteilung der in dieser Arbeit beobachteten autonomen und autogenen Selbstheilungseffekte von zementgebunden Testkörpern im Labormaßstab.

### Messprinzip

Wird eine Struktur zu dynamischen Schwingungen angeregt, entsteht in Abhängigkeit der Körpergeometrie und der Materialkonstanten eine Vielzahl an Schwingungsformen. Diese werden, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, durch eine mehrfache Überlagerung einer stehenden Welle erzeugt. Jede dieser unterschiedlichen Schwingungsmodi geht mit einer individuellen Bewegungsform des Körpers einher und kann theoretisch über eine Übertragungsfunktion (FRF<sup>18</sup>) abgebildet werden. Dabei werden bei einfachen Balken drei unterschiedliche Hauptschwingungsarten, welche sich über eine amplitudenstarke Eigenschwingungsform identifizieren, angeregt: longitudinal, flexural und torsional (Kapitel 3.2). Die Schwingungsanalyse macht sich diese Eigenschaft zu Nutze und detektiert mit entsprechenden Sensoren diese schwingungsabhängigen Eigenfrequenzen.

---

<sup>18</sup> Frequency Response Function (FRF)

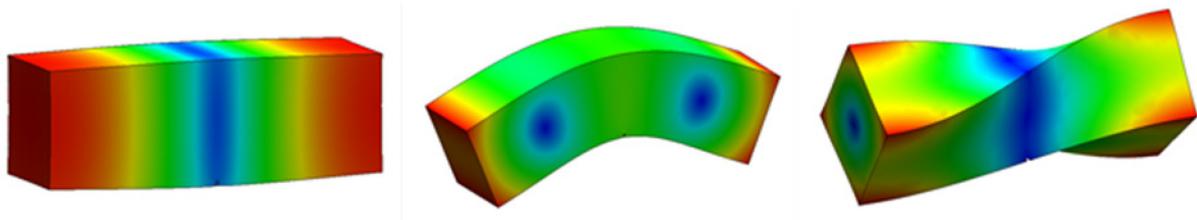


Abbildung 4-7: Schematische Darstellung der drei unterschiedlichen Schwingungsmodi: longitudinaler (links), flexuraler/transversaler (mittig), torsionaler Modus (rechts).

Kleinste Veränderungen in den Materialeigenschaften, zu denen neben den stofflichen Eigenschaften auch lokale Unstetigkeitsstellen zählen, wirken sich auf die Reflektions-, Beugungs- und Dämpfungseigenschaften (Kapitel 3.3) des Gesamtsystems und somit auch auf die fundamentalen Eigenschwingungen sowie ihre Oberschwingungen aus. Werden Kontaktsensoren zur Schwingungsanalyse verwendet, kann deren Masse, besonders bei kleinen und filigranen Testkörpern ebenfalls die Ergebnisse beeinflussen [Ren et al. 2017]. Dies gilt es vorab zu berücksichtigen bzw. auszuschließen.

Basierend auf den Theorien von Euler-Bernoulli (Deformations- und kinetischer Energie), Rayleigh (Rotationsträgheit) und Timoshenko (Rotationsträgheit und Scherdeformation) sowie darauf folgenden experimentellen Studien u. a. von Goens (1931), Kaneko (1975), Pickett (1945), Spinner et al. (1960), Spinner et al. (1958) wurden verschiedene mathematische Ansätze zur Bestimmung von Elastizitäts-, Transversal-, Schermodul sowie der damit verknüpften Poisson-Konstanten getroffen. Die Herleitungen, welche die Umrechnung der Eigenfrequenzen in elastische Konstanten betreffen, basieren auf der Annahme eines isotropen, homogenen quaderförmigen Körpers in Abhängigkeit von seiner Masse und Dimension.

Die Gleichungen für die Umrechnung der Resonanzfrequenzen in die dynamischen Elastizitätsmoduln sowie den Schermodul wurden in dieser Arbeit nach der Richtlinie E1876-15 (2015) verwendet. Der Unterschied zu anderen Umrechnungsdefinitionen [ASTM C215-14 2014, Martinček 1965, Weiler et al. 1995] liegt hauptsächlich in der Festlegung der Korrekturfaktoren. Die Anregung zur Resonanzfrequenz erfolgte dabei über eine Impaktanregung. Im Gegensatz zur Richtlinie ASTM C215-14 (2014) wurden die Impaktpunkte sowie die Positionen der Beschleunigungsaufnehmer für die Anregung der einzelnen Schwingungsmodi den Versuchsbedingungen entsprechend abgewandelt (Abbildung 4-8).



Abbildung 4-8: Position der Impaktanregung (rot) und Beschleunigungsaufnehmer (gelb) für unterschiedliche Schwingungsmodi (von links nach rechts: flexural, torsional, longitudinal) im freien Zustand.

Für die Dimensionskonstanten gilt  $L \geq b \geq t$ .

Longitudinaler Elastizitätsmodul für rechteckige Querschnitte:

$$E = \frac{4mf_l^2 L}{bt K}, \quad \text{Gl. 4-17}$$

mit

$$K = 1 - \frac{\pi^2 \nu^2 D_{eff}^2}{8L^2}, \quad \text{Gl. 4-18}$$

wobei  $D_{eff}$  der effektive Durchmesser ist. Für einen rechteckigen Querschnitt gilt:

$$D_{eff}^2 = \frac{2}{3}(b^2 + t^2) \quad \text{Gl. 4-19}$$

Flexuraler Elastizitätsmodul:

$$E = 0,9465 \left( \frac{mf_f^2}{b} \right) \left( \frac{L^3}{t^3} \right) T_1, \quad \text{Gl. 4-20}$$

wobei  $f_f$  die Resonanzfrequenz der Biegegrundschwingung in Hz und der Korrekturfaktor  $T_1$  mit

$$T_1 = 1 + 6,585(1 + 0,0752\nu + 0,8109\nu^2) \left( \frac{t}{L} \right)^2 - 0,868 \left( \frac{t}{L} \right)^4 - \left( \frac{8,340(1 + 0,2023\nu + 2,173\nu^2) \left( \frac{t}{L} \right)^4}{1 + 6,338(1 + 0,1408\nu + 1,536\nu^2) \left( \frac{t}{L} \right)^2} \right) \quad \text{Gl. 4-21}$$

ist. Da  $T_1$  von der Poisson-Konstanten  $\nu$  abhängig ist, kann mit (vgl. Gl. 3-14)

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad \text{Gl. 4-22}$$

eine iterative Annäherung erfolgen.

Dynamischer Schermodul  $G$ :

$$G = \frac{4Lmf_t^2}{bt} R, \quad \text{Gl. 4-23}$$

wobei  $f_f$  die Resonanzfrequenz der torsionalen Grundschwingung in Hz und der Korrekturfaktor R mit

$$R = \frac{1 + \left(\frac{b}{t}\right)^2}{4 - 2,521 \frac{t}{b} \left(1 - \frac{1,991}{\frac{b}{t} e^{\pi t} + 1}\right)} 1 + \left(\frac{0,00851 b^2}{L^2}\right) - 0,060 \left(\frac{b}{t}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{b}{t} - 1\right)^2 \quad \text{Gl. 4-24}$$

ist.

Die Dämpfungscharakteristik der detektierten Resonanzfrequenzen erfolgt über die Half-power bandwidth [Bendat et al. 2011, Chopra 2007] mit

$$D = \frac{f_2 - f_1}{2f_0}, \quad \text{Gl. 4-25}$$

wobei  $f_0$  die Resonanzfrequenz mit der resonanten Amplitude  $A_{max}$  und  $f_{1,2}$  die Grenzfrequenz bei der der Ausgangsspannungspegel um 3dB abgesenkt wird (Abbildung 4-9). Dies entspricht einem Faktor von  $\pm 1/\sqrt{2}$  der Eingangsspannung ( $A = \frac{A_{max}}{\sqrt{2}}$ ). Eine weitere Definition erfolgt über die Full-Width-at-Half-Maximum (FWHM), bei der  $f_{1,2}$  den Schalleistungsabfall um 50% (= -3dB) markiert.

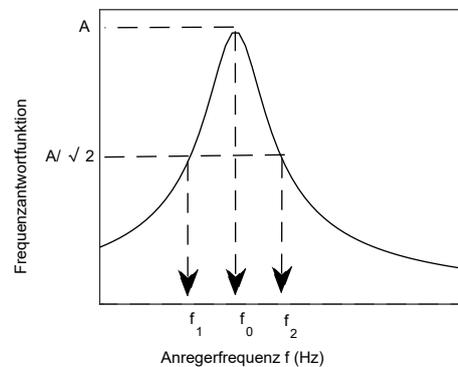


Abbildung 4-9: Transferfunktion für die Dämpfungsbestimmung.

#### 4.4 Sensortechnik und -typen

Die Wahl der Sensoren zur Erfassung akustischer Schallwellen beeinflusst maßgebend die Qualität der Ergebnisse. Neben der Abhängigkeit des physikalischen Messprinzips und der charakteristischen Merkmale (z. B. Übertragungsfunktion, Mittenfrequenz, Sensitivität), der Sensorgröße sowie Sensorkontaktfläche, spielt auch die versuchsbedingte Gebrauchstauglichkeit eine entscheidende Rolle. Dazu zählen die Ankopplungskonditionen sowohl vom Sensor als auch vom Prüfkörper. Da die Sensorankopplung an den Prüfkörper einen erheblichen Einfluss auf die Detektion und Aufzeichnung

der akustischen Welle hat [Colombo et al. 2005, Theobald et al. 2008], muss für einen quantitativen Vergleich unabhängiger Einzelmessungen die Güte der Messwiederholbarkeit bestimmt werden. Generell kann die Ankopplung dabei entweder kontaktgebunden (mit Kleber, Fluid oder trocken) oder über die Luft erfolgen (siehe Kapitel 4.1.2). Während Fluide auf eine zeitlich begrenzte Messdauer ausgelegt sind, eignet sich z. B. Heißkleber als geeignetes Medium für eine widerstandsfähige Ankopplung mit geringer akustischer Impedanz. Aufgrund der porösen Beschaffenheit von zementgebunden Testkörpern kann es daher beim Ablösen der US-Sensoren zu Oberflächenbeschädigungen kommen. Werden bei einer Wiederankopplung an selbiger Stelle nun Zement- und Gesteinspartikeln durch das Ankoppelmedium ersetzt, ändert sich die akustische Impedanz sowie der Brechungsindex mit der Folge einer veränderten Schallwellenausbreitung. Daher wurden im Vorfeld unterschiedliche Methoden für eine reproduzierbare Ankopplung von unterschiedlichen Sensortypen für verschiedene Belastungsszenarien validiert.

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit eingesetzten Sensortypen kurz erläutert und auf ihre Anwendungstauglichkeit sowie Funktionalität überprüft. Dabei handelt es ausschließlich um Kontaktsensoren.

### KRNBB-PC

Der KRNBB-PC-Sensor (KRN Services, Berkley, USA) mit Schraubgewinde verfügt über ein konisches Piezoelement mit einer Übertragungsfunktion von 10 kHz-3 MHz. Der Frequenzbereich zwischen 20 kHz-1 MHz ist nahezu breitbandig [Glaser et al. 1998] und ermöglicht daher eine umfangreiche Frequenzanalyse. Da die Empfängersensoren eine Speisespannung benötigen, wird der Sensor ausschließlich mit dem firmeneigenen analogen Messverstärker KRN AMP-4/12BB-J (max. Vorverstärkung: 27 dB) betrieben. Der Einfluss von Richtwirkungseffekten ist aufgrund des kleinen Punktkontaktes sehr gering. Entwickelt wurde dieser Sensor ursprünglich für hochpräzise materialwissenschaftliche Untersuchungen (z. B. bruchmechanische Gesteinsuntersuchungen) unter Laborbedingungen. Weiterführend lässt sich dieser Sensortyp mittels Hardwaremodifikation vom Hersteller auch als Signalgeber anwenden. Eine Übertragungsfunktion für diese Anwendung lag nicht vor.

Die Ankopplung des KRNBB-PC-Sensors erfolgte über eigens angefertigte Halterungen aus Aluminium und PVC. Die filigrane Tastspitze, welche nur wenige Mikrometer aus dem Gehäuse herausragt (Abbildung 4-10, Mitte), erforderte eine präzise Ausrichtung der Halterung als auch ein exaktes Einschrauben, ohne die Spitze dabei zu beschädigen. Um dies zu verhindern und eine möglichst gleichmäßige sowie reproduzierbare Ankopplung zu erlangen, wurde die offenporige Struktur der zementgebundenen Prüfkörper zuvor an den relevanten Stellen mit speziellem Epoxidharz<sup>19</sup> versiegelt. Für eine verbesserte Energieübertragung eignete sich Ultraschallgel als zusätzliches Koppelmedium. Anwendung fanden die Sensoren innerhalb der Versuchsreihe mit Mörtelprüfkörpern (Kapitel 5). Die geringen Testkörperabmessungen (160x40x40 mm) erforderten eine exakte Bestimmung des

---

<sup>19</sup> Das verwendete Epoxidharz musste einer dauerhaften Versuchsdurchführung mit Wasserlagerung standhalten.

Schalllaufwegs und der dazugehörigen Schalllaufzeiten, um kleinste Veränderungen durch Lagerungs- und Heilungsbedingungen erfassen zu können. Dies konnte über den vorhandenen Punktkontakt bestmöglich realisiert werden.



Abbildung 4-10: Ultraschall KRNB-PC Sensor mit individuell gefertigter Halterung aus Aluminium und PVC.

Abbildung 4-11 zeigt das Ergebnis zweier Ultraschalltestmessungen (Zeitdifferenz: 4 Tage) auf Reproduzierbarkeit mit drei KRNB-PC-Sensoren als Empfänger an einem ungerissenen (ungeschädigten) Mörteltestkörper (Normrezeptur, Tabelle 5-1) mit dem Versuchsaufbau aus Kapitel 5.2. Bedingt durch den Schraubmechanismus haben sich bei einer Neuankopplung die Amplitudenwerte um ein Vielfaches verstärkt bzw. reduziert. Eine Normierung der Signale auf den jeweiligen Maximalwert lieferte trotz vollständigem Messsystemneuaufbau sehr formtreue Signalverläufe (betrachtete Signallänge: 500  $\mu$ s), schließt aber aufgrund der Normierung eine absolute Energiebetrachtung für eine quantitative Schadens- bzw. Selbstheilungsbeurteilung aus. Der durchschnittliche Korrelationskoeffizient zwischen 1. und 2. Messung lag für diesen Signalzeitbereich bei durchschnittlich  $0,9534 \pm 0,0133$  und lieferte hinsichtlich weiterführender Auswerteparameter wie z. B. Centroid Time (213,5  $\mu$ s/207,1  $\mu$ s) und Centroid Frequency (127,7 kHz/124,8 kHz) eine zuverlässige Reproduzierbarkeit. Ein Vergleich der Ankopplung mit und ohne Epoxidharz-Oberflächenbeschichtung liefert mit  $0,9160 \pm 0,0246$  einen etwas geringeren Korrelationskoeffizienten (Abbildung 4-12). Infolge einer Wasserbeanspruchung wäre vermutlich mit noch größeren Abweichungen zu rechnen gewesen.

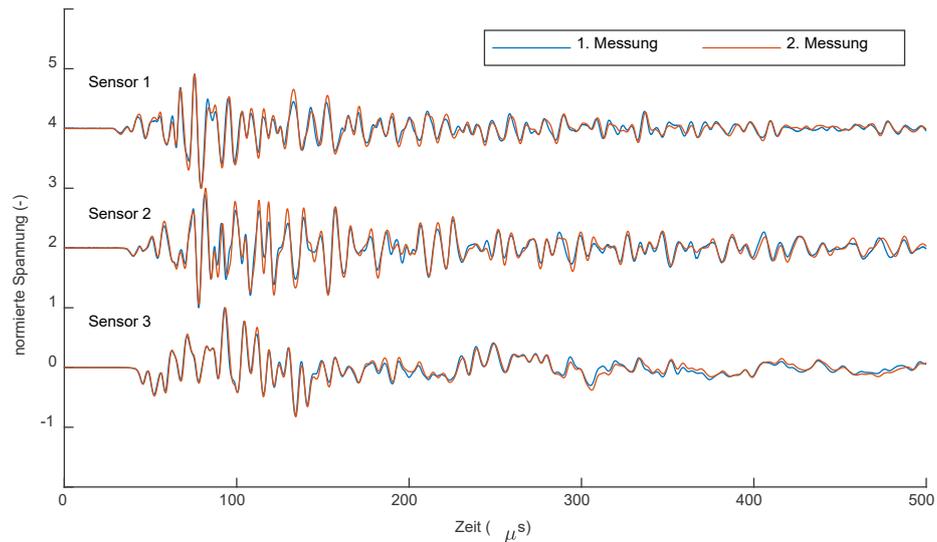


Abbildung 4-11: Ultraschalltransmissionsmessung mit KRNB-PC-Sensoren an Mörteltestkörper zum Test der Reproduzierbarkeit (Impulsanregung: 2µs-Puls, Abtastrate: 20 MHz, Betrachtete Signallänge: 500 µs).

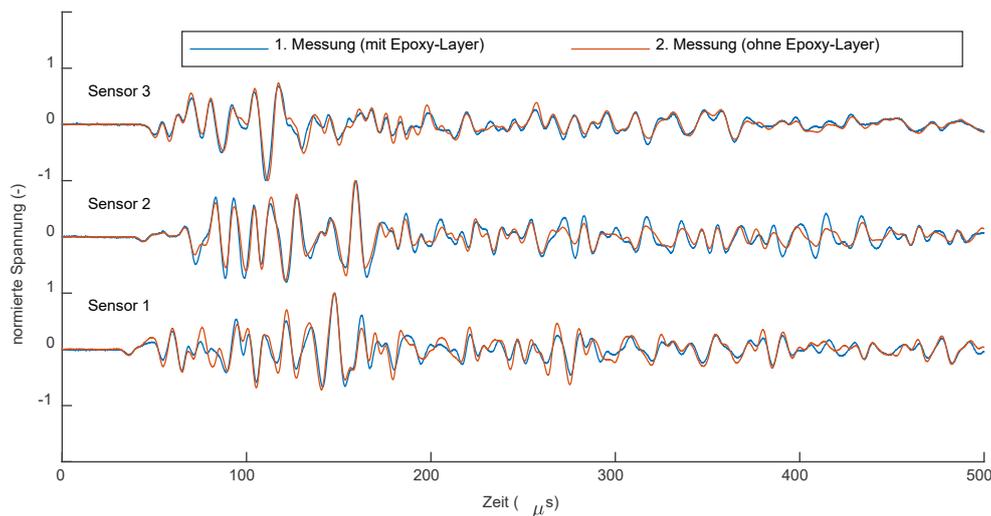


Abbildung 4-12: Ultraschallmessung mit KRNB-PC-Sensoren an Mörteltestkörper zum Test der Reproduzierbarkeit sowie des Einfluss einer Epoxidharz-Oberflächenbeschichtung. Der durchschnittliche Korrelationskoeffizient beträgt  $0,9160 \pm 0,0246$  und liegt etwas unterhalb einer vergleichbaren Messung mit zusätzlicher Epoxidharzbeschichtung als Akoppelfläche.

### Olympus Panametrics Sensoren (V103-RB, V153-RB, V101-RB, V150-RB)

Die Panametrics V103-RB-, V101-RB-, V150-RB- und V153-RB-Sensoren der Firma Olympus (Abbildung 4-13) sind Kontaktsensoren mit einer nominellen Elementgröße von 0,5 Zoll (V103/V153-RB) bzw. 1 Zoll (V101-RB, V150-RB), was gegenüber Punktkontaktsensoren den Vorteil eines erhöhten Wellenenergieeintrags mit sich bringt. Die Sensoren können sowohl als Signalgeber als auch als Signalempfänger eingesetzt werden. Das robuste Design ermöglicht einen vielfältigen Einsatz, sowohl für Longitudinal- als auch Schwerwellen. Aufgrund der Schutz-/Anpassungsschicht aus Keramik lassen sich die Sensoren direkt mit Heißkleber ohne zusätzliche Halterungskonstruktionen

ankoppeln und ermöglichen dadurch eine konsistente Messung über einen längeren Zeitraum (Kapitel 4.1.3). Wird die Ankoppelschicht möglichst dünn und gleichmäßig aufgetragen, sind ebenfalls reproduzierbare Messvorgänge nach einer wiederholten Ankopplung an der Bauteiloberfläche möglich (Abbildung 4-14). Die wesentlichen technischen Parameter der einzelnen Olympus Panametrics-Sensoren sind in Tabelle 4-1 aufgeführt.

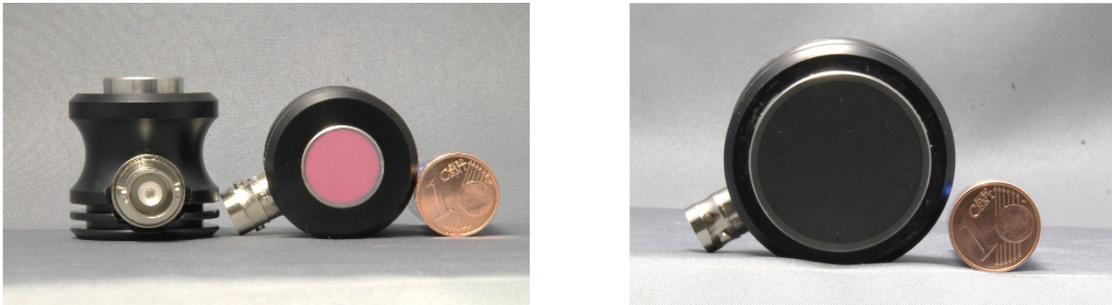


Abbildung 4-13: Links: Olympus Panametrics V103-RB. Größengleich mit V153-RB. Rechts: Olympus Panametrics V101-RB. Größengleich mit V150-RB.

Tabelle 4-1: Sensorspezifische Charakteristika von Olympus Panametrics V103-RB, V101-RB, V150-RB.

Sensortyp	Wellentyp	nomielle Elementgröße (inches / mm)	Mittelfrequenz (MHz)
V103-RB	longitudinal	0,5 / 13	1,0
V153-RB	transversal	0,5 / 13	0,5
V101-RB	longitudinal	1,0 / 25	0,25
V150-RB	transversal	1,0 / 25	0,5

Nach absoluten Kalibrierversuchen mit Balldrops und numerischen Berechnungen von Wu et al. (2018) ergibt sich eine nahezu lineare Frequenzantwort zwischen 100 kHz und 1 MHz. Unterhalb von 100 kHz nimmt die Sensitivität stark ab. Ebenso zeigte sich, dass die Dämpfung infolge einer Sensorankopplung an einer Aluminiumplatte mit Heißkleber, im Vergleich zu Vaseline, ab circa 10 kHz zunimmt. Allerdings sind die individuellen Kalibrierversuche von Ultraschall- und SEA-Sensoren ein stark diskutiertes Thema, was sich in sehr ausführlichen Studien u. a. von Ono (2016, 2017, 2018), Ono et al. (2017) nachlesen lässt.

Werden einzelne Signalparameter wie Amplitudenwerte oder Ankunftszeiten aus dem Rohsignal berechnet, kann die sensorspezifische Richtcharakteristik ein einflussgebender Faktor auf die Datenanalyse unterschiedlicher Untersuchungsverfahren sein. Abbildung 4-15 zeigt das winkelabhängige Amplituden- und Ersteinsatzverhalten der Longitudinalwelle, bemessen an einem Aluminiumhalbzylinder ( $\varnothing$  200 mm). Die starke Signalschwächung (Amplitude) mit zunehmenden Einfallswinkel wirkt sich besonders auf die Datenerfassung beim ToFD-Verfahren (Kapitel 4.1.2) als auch bei der SEA (Kapitel 4.2) aus. Parallel dazu ist die winkelabhängige Ersteinsatzzeit aufgetragen. Wird nämlich in der Schalllaufzeitberechnung die Sensorankoppelposition einfachheitshalber als Punkt-

und nicht als Flächenkontakt berücksichtigt, nimmt der Einfluss mit der nominellen Elementgröße des Sensors stetig zu.

Anwendungen fanden die Sensoren bei der Untersuchung von Betonprüfkörpern im Labormaßstab (Kapitel 6) als auch bei den Großversuchen (Kapitel 0).

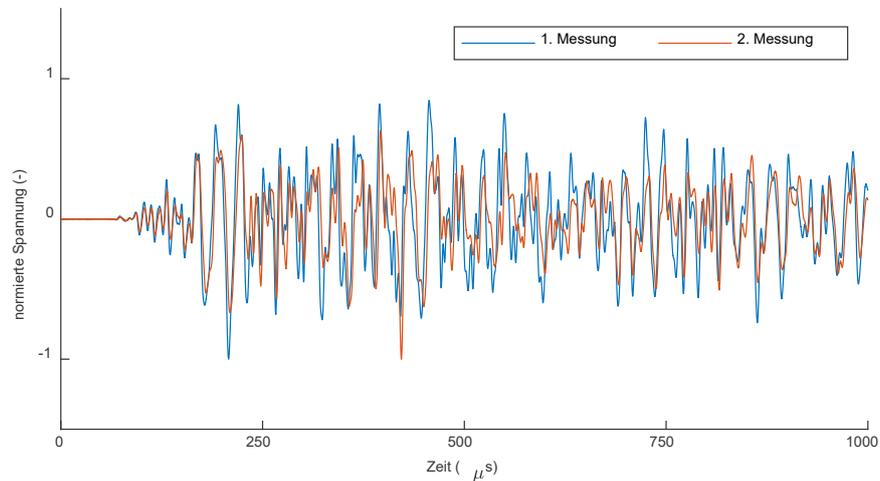


Abbildung 4-14: Indirekte Ultraschalltransmissionsmessung mit Olympus Panametrics V103-Sensoren an gerissenem Betonbalken aus Großversuch zum Test der Reproduzierbarkeit (Sensordistanz: 40 cm, Anregerfrequenz: 350 kHz, Abtastrate: 20 MHz, Betrachtete Signallänge: 1000  $\mu\text{s}$ ). Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,7.

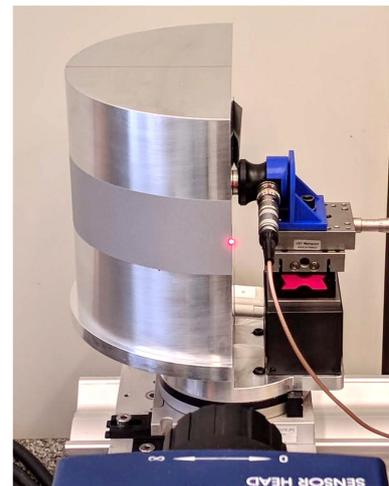
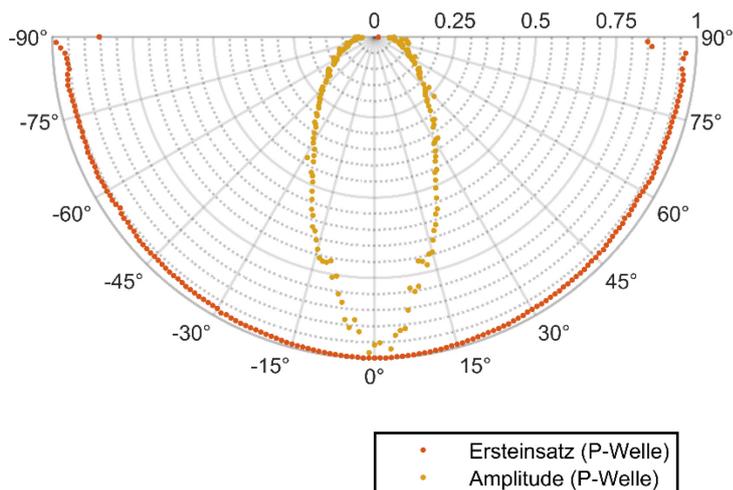


Abbildung 4-15: Bemessung der winkelabhängigen Amplituden- und Ersteinsatzverteilung (1-Grad-Schritt) eines mit Heißkleber angebrachten SE-Gebersensors „Panametrics V103-RB“ an einem Aluminiumhalbzylinder mit 1 MHz-Sinusimpuls. Empfänger ist ein Laser-Doppler-Vibrometer (OFV-5000/OFV 505/DD-300, Polytec). Die Werte sind auf einen rechtwinkligen Einfall bei 0° normiert.

### Geotron – UP-DW

Bei den UP-DW-Sensoren der Firma Geotron Elektronik handelt es sich um eine Prüfkopfkombination aus Geber- und Empfängereinheit, welche aufgrund ihrer Tastspitze und der handlichen Bauweise für schnelle und einfache Ultraschallmessungen in Transmission geeignet sind. Um das S/N-Verhältnis zu verbessern, genügt ein Fluid (z. B. Ultraschallgel) als Koppelmedium. Da der Frequenzbereich nur bis ca. 100 kHz ausgelegt ist, dienen diese Prüfköpfe vorwiegend für die Bestimmung von US-Laufzeiten von Dehnenwellen oder von Resonanzfrequenzen. Die Sensoren sind optimiert für einen Betrieb mit dem herstellerinternen Ultraschallgenerator Geotron USG 40 (Ausgangsspannung: 800 V)). Verwendet wurden diese innerhalb der US-Prüfung in Kapitel 6.1.



Abbildung 4-16: UPE/G-Sensoren der Firma Geotron Elektronik (Bild aus [Moser 2014])

### Beschleunigungssensoren und Impakthammer

Für die Bestimmung von Resonanzfrequenzen sowie eines Proof-of-Concept-Ansatzes einer Oberflächenwellenanalyse mit Impaktanregung wurden Impakthammer mit Metallspitze und Kraftmessdose des Typs 8204 der Firma Brüel & Kjaer mit einer Anregungsfrequenz bis ca. 10 kHz angewandt. Aufgrund der starken Dämpfungseigenschaft der zementgebundenen Werkstoffe war eine ausreichend starke Impaktanregung von höherfrequenten Oberschwingungen nur bedingt möglich gewesen. Die Aufzeichnung der Schwingungsmoden erfolgte mit kontaktgebundenen piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern: ein Triaxial-Sensor der Firma Kistler (Model 8694M1) mit einer laut Datenblatt angegebenen Frequenzbandbreite von bis zu 20 kHz<sup>20</sup> sowie ein uniaxialer Aufnehmer der Firma PCB Piezotronics (Model 352C33) mit einer Bandbreite bis 10 kHz<sup>21</sup>. Kalibrierungsmessungen ergaben, dass die geringen Sensorgewichte von 2,5 gr. bzw. 5,8 gr. bei den untersuchten Mörtel- und Betontestkörpern keinen Einfluss auf die Frequenzantwortfunktion hatten und folglich vernachlässigt werden dürfen [ASTM C215-14 2014, Jurowski et al. 2015]. Als Ankopplung diente ein vom Hersteller mitgeliefertes Wachs. Eine Übersicht der spezifischen Sensoreigenschaften ist in Tabelle 4-2 gegeben. Die Datenerfassung erfolgte versuchsabhängig mit einem Datenerfassungssystem mit systemintegrierter Signalanalyse des Typs LMS SCADAS Mobile (LMS International, B) oder einem mobilen digitalen

<sup>20</sup> ±5 % bei einer Sensitivität von 4 mV/g

<sup>21</sup> ±5 % bei einer Sensitivität von 100 mV/g

USB-Oszilloskop HS4/HS5 (TiePie engineering, NL) mit einer separaten ICP-Versorgungseinheit (PCB-480B21, PCB Piezotronics). Die Bestimmung des Frequenzspektrums aus den Beschleunigungsdaten erfolgte mittels Fast Fourier Transformation (FFT). Mit Hilfe der integrierten Kraftmessdose im Impakthammer konnte eine Amplitudensynchronisation mit den Beschleunigungssensordaten erfolgen, was hinsichtlich der Fehlermessung eine verbesserte Reproduzierbarkeit der Datenanalyse ermöglichte.

Tabelle 4-2: Spezifische Kennwerte der verwendeten Beschleunigungsaufnehmer sowie des Impakthammers.

Dyn. Eigenschaften	Beschleunigungssensoren		Dyn. Eigenschaften	Impakthammer
	PCB	Kistler		Brüel & Kjaer
Sensitivität (mV/g)	100 ( $\pm 10\%$ )	4 ( $\pm 5\%$ )	Spannungssensitivität (mV/N)	22.7
Messbereich (g pk)	$\pm 50$	$\pm 1000$	Messbereichsendwert (N)	220
Frequenzbereich (Hz)	0.5 - 10000	10 - 20000	Messbereichsfehler (%)	$< \pm 2$
Resonanzfrequenz (kHz)	$\geq 50$	80	max. Frequenzlimit (kHz), typisch	60
Querempfindlichkeit (%)	$\leq 5$	5		



## 5 Mikro-Ebene: Mörteltestkörper

Um ein Verständnis über die Auswirkungen und den Einfluss der in Kapitel 2 beschriebenen Heilungsmittel auf die betontechnologischen Eigenschaften sowie die Eignung zerstörungsfreier Prüfmethoden zur Charakterisierung der Selbstheilungseffizienz zu schaffen, wurden in einem ersten Schritt Mörtelprüfkörper (160x40x40 mm), basierend auf der Europäischen Norm DIN EN 196-1:2005-05, hergestellt. Diese dienten zugleich für die Untersuchungen mit dem auf polyurethanbasiertem Heilungsmittel HA Flex SLV AF (W. R. Grace & Co.), welches in der regulären Baupraxis für die nachträgliche Verpressung von Haarrissen in Betonbauteilen angewendet wird. Auf Basis dieser Normrezeptur wurden weitere Mörteltestkörper mit unterschiedlichen Dosierungen für die autonome und autogene Selbstheilung mit eingebetteten Hydrogelgranulaten (FLOSET CC27, SNF Floerger) sowie mit Bakterien („BAC“) imprägnierten Blähtonkugeln hergestellt und geprüft. Um eine vergleichbare Verarbeitbarkeit bzw. Konsistenz für die Frischmörtelmischungen mit den unterschiedlichen Heilungsmitteln zu erhalten, mussten die Rezepturen mit variierenden Mengen an zusätzlichem Anmachwasser entsprechend angepasst werden. Mörtelrezepturen mit imprägnierten sowie naturbelassenen Liapor-Tonkugeln, welche eine Kornverteilung von 1-4 mm aufweisen, wurden entsprechend der Normsandsieblinie angepasst. Die einzelnen Rezepturen sind in den darauffolgenden Abschnitten aufgeführt. Im Gegensatz zu den Hydrogelen und Bakterien erfolgte die Rissverschließung mit Polyurethan („SLV“) manuell von Hand, da eine Mikroverkapselung von Polyurethanen zu diesem Zeitpunkt technisch noch nicht umsetzbar war. Eine Einbettung von Glaskapillaren (Kapitel 2.4) hätte den Nachteil einer auf den Querschnitt bezogenen starken Veränderung der homogenen Materialstruktur gehabt, was sich z. B. in einer deutlichen Schwächung der Biegezugfestigkeit geäußert hätte.

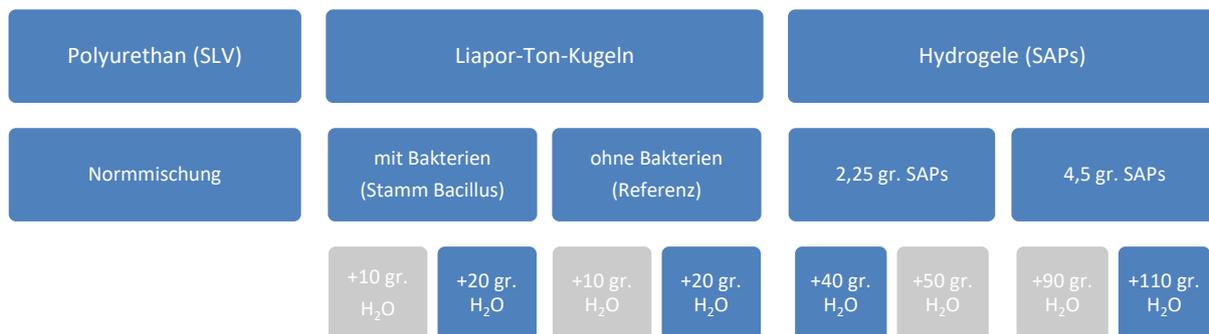
Die Präparation der Testkörper, die Versuchsdurchführungen als auch die zu integrierende Messtechnik mussten zusammen ein geschlossenes Konzept ergeben. Maßgebende Schwerpunkte lagen dabei auf der Reproduzierbarkeit für eine konstante mechanische Beanspruchung bzw. Schädigungsinitiierung der Testkörper, konstante Lagerungsbedingungen während der Heilungsphase sowie adaptive Mess- und Evaluierungstechniken. All diese Faktoren führen mit ihren individuellen Messfehlern und Streuungen zu einer sich aufsummierenden Fehlerfortpflanzung. Erst wenn die Unterschiede der Charakteristika der verschiedenen Testobjekte die versuchsbedingten Messstreuungen überwiegen, lassen sich schließlich zuverlässige Erkenntnisse aus dem Versuchskonzept ableiten. Daher wurden für die Evaluierung der Heilungseffizienz je Mörteltestrezeptur vier Prüfkörper hergestellt, wobei einer als Referenztestkörper fungierte. Eine Übersicht gibt Tabelle 5-2. Als Schädigung dienten Biegerisse mit einer Rissöffnung zwischen 150-300 µm, gemessen an der Betonoberfläche. Die jeweiligen Referenzprismen wurden den

vollständig identischen Lagerungsbedingungen im ungeschädigten Zustand ausgesetzt. Dabei ließen sich zeitabhängige chemische und physikalische Prozesse, wie z. B. Nacherhärtung, Schwinden und Kriechen, sowie Temperatureinflüsse charakterisieren, welche parallel zum Heilungsprozess abliefen. Um eine vorzeitige Aktivierung der Heilungsmittel zu unterdrücken, erfolgte, abweichend von der Europäischen Norm, für alle Mörtelprüfkörper nach der Ausschalung keine Wasserlagerung. Die Aushärtung erfolgte für 28 Tage in einer Klimakammer mit 20°C und 65% rel. Luftfeuchte (LF).

Tabelle 5-1: Normmischung für Mörteltestkörper (160x40x40 mm).

	Normrezeptur			
	d/D	Menge (g)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Volumen (cm <sup>3</sup> )
<b>CEM I 42.5 N</b>		450	3,17	141,96
<b>Sand</b>	0/2	1350	2,65	509,43
<b>Wasser</b>		225	1,00	225,00
<b>Gesamt</b>		<b>2025</b>		<b>876,39</b>

Tabelle 5-2: Übersicht aller Mörteltestkörperkompositionen für die unterschiedlichen Heilungskonzepte (Polyurethan, Bakterien, Hydrogele). Grau hinterlegte Zusammensetzungen werden in dieser Arbeit innerhalb der zerstörungsfreien Prüfungen nicht weiter beschrieben.



Die Versuchsdaten entstammen überwiegend aus einer am Lehrstuhl entstandenen Abschlussarbeit von Maznikova (2015). In Abhängigkeit der Selbstheilungstechnik sind unterschiedliche Heilungs- und Messabläufe notwendig. Diese werden in den folgenden Kapiteln separat erläutert.

## 5.1 Versuchsdurchführung und betontechnologische Eigenschaften

Um ein Auseinanderbrechen der Mörtelprismen während der Rissinitiierung mittels 3P-Biegeversuch zu verhindern, wurden zwei CFK-Längssteifen (10x160 mm, 1,4 mm Stärke) mit Epoxidkleber als Armierung angebracht (Abbildung 5-1). Dies hatte den Vorteil, dass keine zusätzlichen Spezialschalungen mit Eisenbewehrungsstäben hergestellt werden mussten. Somit konnte ein möglicher Einfluss auf die akustische Wellenausbreitung durch die Armierung ausgeschlossen werden. Zugleich ließ sich eine Beeinträchtigung für die Sensorankopplung an den Endflächen umgehen. Eine mittige Kerbe (2-3 mm) an der Unterseite des Testkörpers garantierte eine kontrollierte Rissinitiierung.

Voruntersuchungen mit zwei  $\varnothing 2$  mm starken Stahlgewindestäben als Ersatzbewehrungsstäbe ergaben, dass sich dieser Verbund sehr dominant auf das Kraft-Dehnungsverhalten auswirkte und eine eindeutige Differenzierung zwischen der Zugfestigkeit der Stabbewehrung und einer kraftschlüssigen Rissverschließung deutlich erschwert wurde.

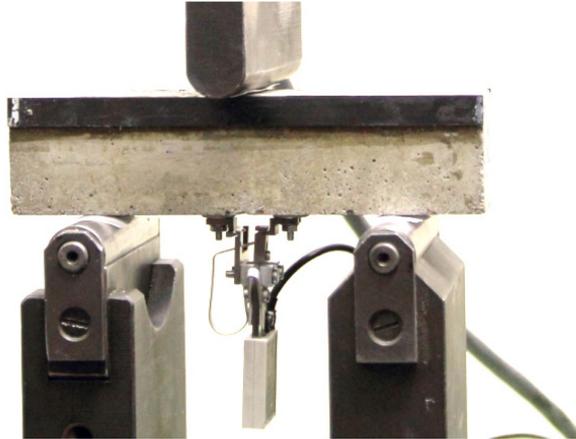


Abbildung 5-1: Versuchsaufbau für rissöffnungsgesteuerten 3-P-Biegeversuch für Mörteltestkörper mit seitlich angebrachter CFK-Lamellen Armierung.

Die CFK-Längsstreifen hingegen verursachten aufgrund der sehr hohen Zugfestigkeit ( $2,81 \text{ kN/mm}^2$ ) sowie in Kombination mit der verwendeten Universalprüfmaschine (Amsler Otto Wolpert-Werke GmbH) und dem Dehnungsaufnehmer (Typ DD1, HBM GmbH) eine schwer zu kontrollierende rissweitengesteuerte Schädigungsinitiierung (exemplarisch in Abbildung 5-3). Ein Überschreiten der angestrebten  $800 \mu\text{m}$  Rissweite fand jedoch nicht statt (Abbildung 5-3, blaue Kurve). Nach Erreichen der maximalen Kraftaufnahme kam es zu einem schlagartigen Abfall der Kraftabnahme. Da die maximale Biegezugfestigkeit von CFK noch nicht erreicht wurde, kann davon ausgegangen werden, dass es sich um einen Verbundverlust der Armierung handelte. Dies hat den Vorteil, dass bei einer erneuten rissweitenkontrollierten Biegebeanspruchung kaum eine Tragwirkung aus der Armierung resultiert. Ein erneuter Kraftanstieg könnte somit rein auf die versuchsbedingte Selbstheilungseffizienz umgelegt werden. Dies ist besonders für die Untersuchung hinsichtlich der Wiederbelastung mit dem kraftschlüssigen Polyurethan („SLV“) relevant. Um ein Auseinanderbrechen der Mörtelprismen im zweiten Belastungstest zu verhindern, sowie den Kraftverbund ausschließlich auf den Heilungsgrad zu beschränken ( $< 0,8 \text{ mm}$ ), fand die zweite Belastungsprüfung bis maximal  $0,4 \text{ mm}$  statt. Die mit aufgeführten Referenztestkörper („Ref“) innerhalb einer Prüfserie sollten den Einfluss der strukturveränderten Wirkung während der Heilungsphase im ungeschädigten Zustand erfassen. Die Referenztestkörper wurden einmalig einem 3-P-Biegeversuch nach dem Wiederbelastungskonzept bis zu einer Rissweite von  $0,4 \text{ mm}$  unterzogen. Dies ist für die Betrachtung und einen Vergleich des Rissöffnungsverhaltens innerhalb der jeweiligen Serie zu beachten. Das detaillierte Belastungsprogramm für den 3-P-Biegeversuch sowie die jeweiligen detaillierten Prüfungsergebnisse sind tabellarisch in Appendix B dargestellt.



Abbildung 5-2: Flussdiagramm zur Darstellung des Versuchablaufs zur Evaluierung der Heilungseffizienz von Mörtelprismen mit Selbstheilungseigenschaften.

Der gesamte Versuchsablauf für die Untersuchung der Mörtelprüfkörper ist als Flussdiagramm in Abbildung 5-2 dargestellt. Die Ergebnisse aus den 3-P-Biegeversuchen werden in „initial“ (Anfangsbelastung) und „geheilt“ (Wiederbelastung) unterteilt, während die ZfP-Ergebnisse in „initial“, „gerissen“, „geheilt“ und „wiederbelastet“ kategorisiert werden. Aufgrund der unterschiedlichen Heilungsmechanismen unterschied sich das Heilungskonzept. In Kooperation mit den Forschungspartnern der TU Delft sowie der Universität Gent wurde die Dauer der Heilungsphasen auf eine Zeitspanne von 4 bzw. 30 Tage festgelegt.

### Polyurethan (SLV)

Zusätzlich zu den fix angesetzten ZfP-Messungen vor und nach dem Belastungstest erfolgte zur Überwachung des Heilungsprozesses mit Polyurethan („SLV“) eine In-situ-Messung mit Ultraschall. Ziel war es, den Aushärtungsprozess zu beobachten und Rückschlüsse über das zeitabhängige Aushärtungsverhalten schließen zu können. Um eine nachträgliche Evaluierung der Heilungseffizienz zu vereinfachen, wurde das Heilmittel mit fluoreszierenden Pigmenten vermischt. Beeinträchtigungen auf die Viskosität durch die Pigmente wurden nicht festgestellt. Die Verfüllung der gerissenen Mörtelprismen erfolgte nach dem initialen 3-P-Biegeversuch im entlasteten Zustand mittels Spritze und Kanüle. Zusätzlich wurden die Seitenflächen mit Klebeband versiegelt, um ein seitliches Hinausfließen des Polyurethans zu verhindern und eine bestmögliche Sättigung des offenen Risses zu erzielen (Abbildung 5-4). Nach vier Tagen Aushärtung in einer Klimakammer (20 °C, 65 % rel. Feuchte) erfolgte eine erneute rissgesteuerte Biegebeanspruchung bis 0,4 mm (Abbildung 5-3, rote Kurve). Obwohl alle Testkörper nach der initialen Rissinitiierung nahezu identische DMS-Werte (entlastet) aufwiesen (Abbildung 5-6, rechts), zeigte sich nach Abschluss der Versuchsdurchführung, dass die benetzten Rissflächen unterschiedlich groß waren. Während bei den Testkörpern „SLV I/II“ das Heilmittel bis auf circa Höhe der angebrachten Armierung eingedrungen war, kam es bei Testkörper „SLV III“ nur im unteren Kerbenbereich bis zu einer Tiefe von maximal 1,5 cm zu einer Durchdringung (Abbildung 5-5). Dies spiegelte sich auch in den Maximalbelastungen (Abbildung 5-6, links) wieder. Mit zunehmendem Anteil an kraftschlüssigem Rissverbund stieg die maximal zu erreichende Wiederbelastung. Dabei übertraf „SLV I/II“ bei der Wiederbelastung die Biegezugfestigkeit des reinen zementgebundenen Werkstoffes aus der Anfangsbelastung mit 125 % bzw. 151 %. „SLV III“ erreichte hingegen nur einen Wert von 85 %. Des Weiteren traten aufgrund des kraftschlüssigen Verbunds bei „SLV I/II“ neuartige Rissformationen im ungeschädigten Bereich auf (Abbildung 5-4, rechts). Expansionseffekt des Polyurethans sowie Ablösungen des „SLVs“ und von Sandpartikeln in den neu entstandenen Rissen führten zu einer erneuten Blockade der Risse (Abbildung 5-6, rechts).

Hinsichtlich der Dehnbarkeit, konnte bereits Feiteira et al. (2014) nachweisen, dass mit dem „SLV“ eine Dehnrate von 50-100 % erzielt werden kann, ehe es zu einem Verlust des Kraftverbundes an den Rissflanken bzw. einem Materialversagen kommt. In Abbildung 5-7 ist ein vergrößerter Ausschnitt des Kraft-Dehnungs- (Rissöffnungs-) Verhältnisses während der Wiederbelastung gezeigt. Während sich die maximale Dehnung bis zur Rissinitiierung der zuvor ungeschädigten Testkörper (blaue Kurve) im sehr konstanten Bereich zwischen 0,007-0,008 mm bewegt, werden bei der Wiederbelastung (rote Kurve) bis zum Verbundversagen Werte zwischen 0,018 mm („SLV III“) und 0,024 mm („SLV I/II“) erreicht. Wird angenommen, dass sich die materialspezifische Dehnung des Polyurethans sowie der zementgebundenen Matrix konstant linear verhält, kann aus dem Anstieg die maximale Dehnbarkeit abgelesen werden. Somit ergeben sich widererlangte Dehnungen von circa 63-85 % (Abbildung 0-4, Appendix B). Dies entspricht den angegebenen Werten aus der Literatur.

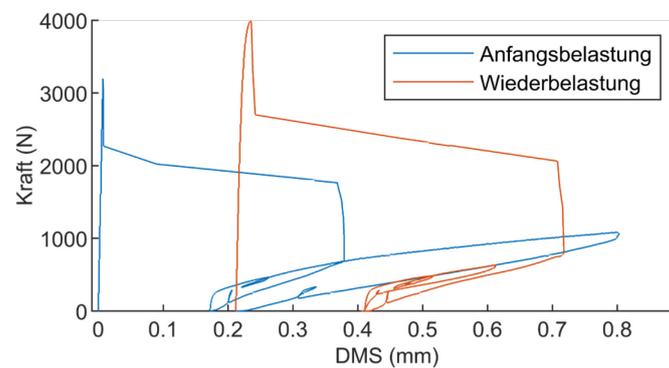


Abbildung 5-3: Kraft-Dehnungs- (Rissöffnungs-) verlauf für Mörteltestkörper „SLV I“. Rissöffnungsgesteuertes Belastungsszenario bis maximal 0,8 mm mit DMS-Aufnehmern. Wiederbelastung erfolgt nach vollständiger Kraftentlastung bis maximal 0,4 mm.



Abbildung 5-4: Links: Manuelle Verfüllung des Risses mit niedrigviskosem Polyurethan (angereichert mit fluorisierenden Pigmenten). Mitte: Ausgehärtetes Heilmittel nach 4 Tagen (Bild zeigt „SLV II“). Rechts: Bildung neuartiger Rissstrukturen nach Heilung und anschließender Wiederbelastung (Bild zeigt „SLV II“).

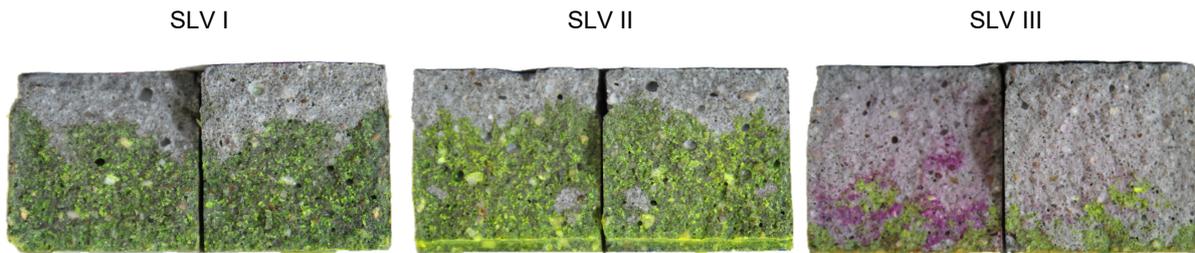


Abbildung 5-5: Querschnittsbilder der „SLV“-Mörteltestkörper nach beendeter Versuchsdurchführung. Die fluoreszierende Benetzung dient als Indikator für die Polyurethanverteilung nach einer manuellen Verfüllung.

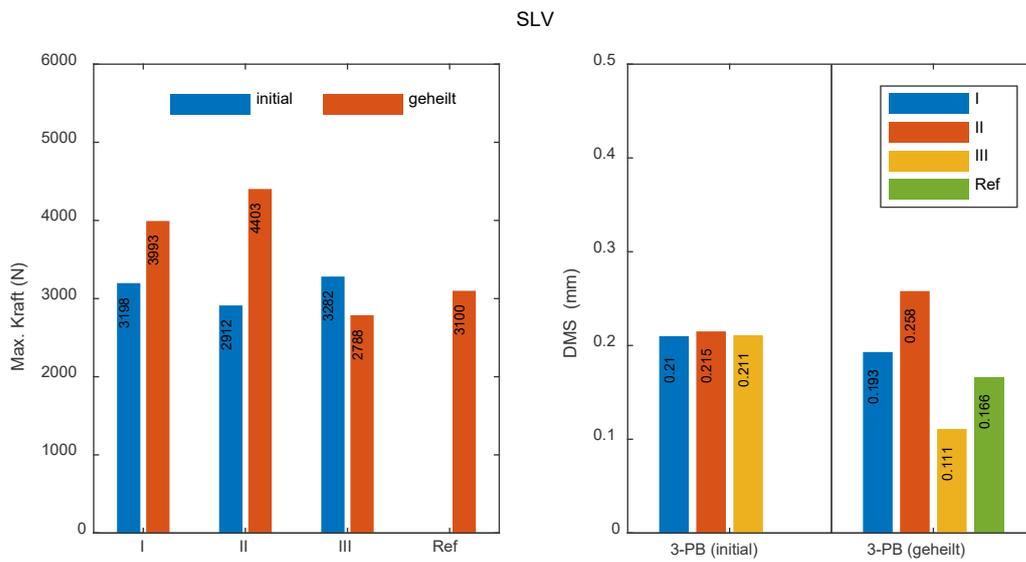


Abbildung 5-6: Maximale Belastungs- und Rissöffnungswerte für „SLV“-Mörteltestkörper für initialen 3-Punkt-Biegeversuch (=Anfangsbelastung) und vier Tage nach der Selbstheilung /Aushärtung (=Wiederbelastung).

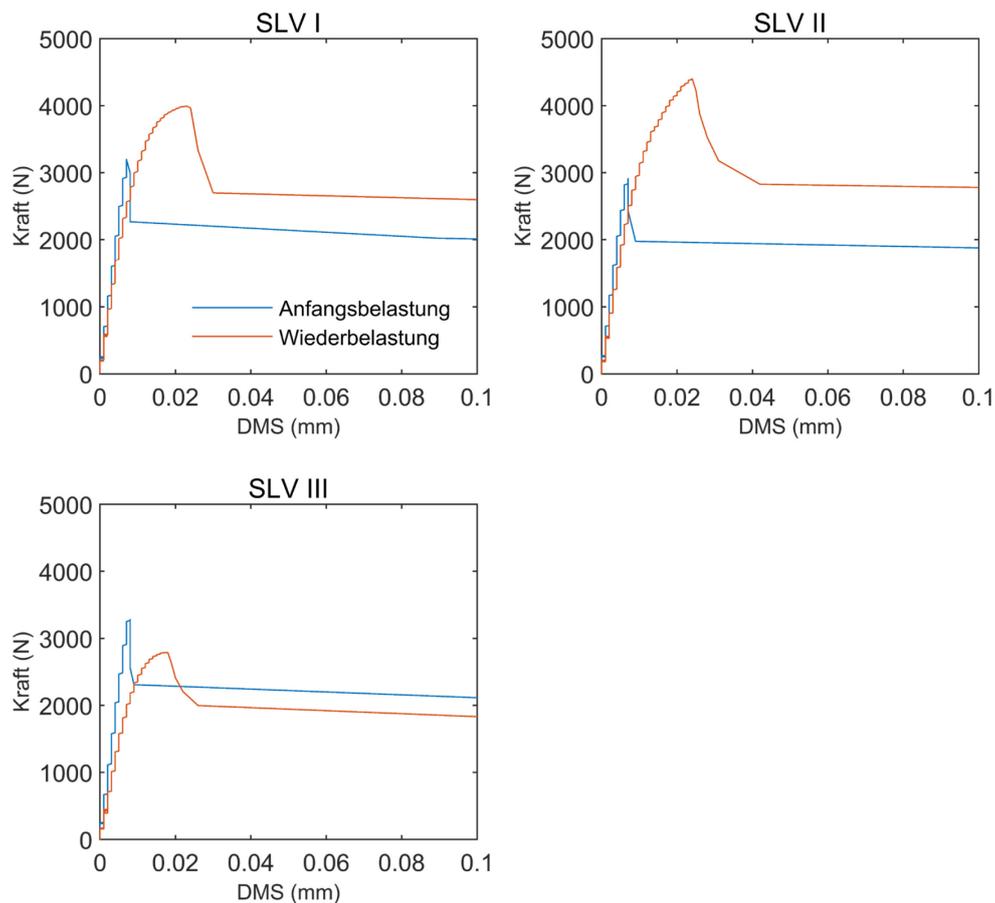


Abbildung 5-7: Detaillierter Kraft-Dehnungs- (Rissöffnungs-) verlauf für Mörteltestkörper „SLV I-III“ im Bereich von 0,0 bis 0,1 mm nach manueller Verfüllung.

### Bakterien (BAC)

Für die Untersuchung von Mörtelprismen mit bakterienbasierten Selbstheilungseigenschaften der Gattung *Bacillus* stellte die TU Delft die imprägnierten Liapor-Tonkugeln als Zuschlagsstoff zur Verfügung. Eine vordefinierte Rezeptur für die Testkörperherstellung ist nicht vorhanden. Da das Verfahren zur Verkapselung der Bakterien noch nicht automatisiert und die Güte der Imprägnierung nur schwer quantifizierbar ist, kann eine genaue Dosierung der erforderlichen Menge an Heilmitteln vom Entwickler nicht angegeben werden. Folglich wurde ein eigenes Konzept mit unterschiedlichen Dosierungen an Heilmitteln sowie eine modifizierte Sieblinie mit variierendem Wassergehalt konzipiert. Die Herstellung von unterschiedlichen Grundrezepturen soll zugleich Aufschluss über die Auswirkungen auf die betontechnologischen Eigenschaften wie Druckfestigkeit, Ausbreitmaß und Elastizitätsmodul geben.

Parallel zu den Mörtelprismen mit imprägnierten Liapor-Tonkugeln wurde eine Prüfserie mit nicht-imprägnierten Tonkugeln hergestellt, welche die exakte gleiche Zement-Sandzusammensetzung und Wasserdosierung aufweist (Tabelle 5-3). Damit ist es möglich, den direkten Einfluss der zusätzlich eingebrachten Stoffe innerhalb der bakterienbasierte Heilung zu analysieren. Dennoch gilt es zu berücksichtigen, dass die Selbstheilung immer auch von der individuellen Rissformation abhängt. Im Folgenden wird für Mörteltestkörper mit Bakterien die Bezeichnung „Liapor mit BAC“ sowie die

entsprechende Referenzprüfserie mit „Liapor ohne BAC“ verwendet. Die Klammer im Anhang gibt den zusätzlichen Anteil an Extra-Wasser an.

Tabelle 5-3: Mischungsentwurf für Mörteltestkörper mit eingebrachten Liapor-Tonkugeln für eine bakterienbasierte Heilung („Liapor mit BAC“) sowie eine parallel hergestellte Referenzprüfserie („Liapor ohne BAC“).

		Liapor ohne BAC			Liapor mit BAC		
	d/D	Menge (g)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Menge (g)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Volumen (cm <sup>3</sup> )
<b>CEM I 42,5 N</b>		463	3,17	146,06	463	3,17	146,06
<b>Sand</b>	0,125/0,25	180	2,65	67,92	180	2,65	67,92
	0,25/0,5	320	2,65	120,75	320	2,65	120,75
	0,5/1	355	2,65	133,96	355	2,65	133,96
<b>Liapor-Tonkugeln</b>	1/4	258	0,84	307,14	285	0,93	307,14
<b>Wasser</b>		231,5	1	231,50	231,5	1	231,50
<b>Gesamt</b>		1807,5		1007,34	1834,5		1007,34
<b>Extra-Wasser</b>		<b>10/20</b>	<b>1</b>	<b>10/20</b>	<b>10/20</b>	<b>1</b>	<b>10/20</b>

Für eine homogene Verteilung der Liapor-Tonkugeln über den Querschnitt, musste neben der Anpassung der Sieblinie, auch der Verdichtungsprozess modifiziert werden. Aufgrund der auftriebenden Wirkung der porösen Kugeln wurde die Mischung in zwei zeitlich getrennte Abschnitte für jeweils 15 Sekunden eingebracht und verdichtet. Abbildung 5-8 zeigt jeweils den Querschnitt eines Mörtelprismas, hergestellt mit dem normierten und dem optimierten Verfahren. Die betontechnologischen Kennwerte in Abbildung 5-9 offenbaren, wie deutlich der Einfluss der Bakteriensuspension ist. Während die Differenzen zwischen den variierenden Wassermengen absehbar waren, reduziert die Mischung aus Bakteriensporen, Calciumlaktat und Hefeextrakt sehr deutlich die Dichte als auch die Druckfestigkeit. In Anbetracht der Resultate von Schreiberová et al. (2019) scheint der Einfluss des dominierenden Hefextraktes für diese stark verminderten Druckfestigkeiten verantwortlich zu sein.

Nach der initialen Rissinitiierung der Mörtelprismen wurden diese für sechs Wochen in einer Klimakammer einem Nass-Trockenzyklus unterzogen. Im Gegensatz zu einer reinen Unterwasserlagerung fördert der regelmäßige Wechsel einer Wasser- und Luftzufuhr die Aktivierung der Sporen sowie die Bildung von zusätzlichem Calciumcarbonat. Dies simuliert in beschleunigter Form die natürlichen Umwelteinwirkungen [Tziviloglou et al. 2016a, Yang et al. 2009]. Dementsprechend wurde ungefiltertes bzw. unbehandeltes Leitungswasser genutzt, welches im 12-Stunden-Rhythmus von einem Behälter in den anderen wechselte. Für eine Beschränkung der im Wasser enthaltenen Kalkmoleküle auf die Heilungseffekte, diente frisches Leitungswasser nur zum Ausgleich von Verdunstungen. Die Testkörper mit imprägnierten Liapor-Ton-Kugeln wurden von der Referenzprüfserie ohne Bakterien getrennt gelagert, um einen Austausch von Sporen über das Wasser

auszuschließen. Der Aufbau ist in Abbildung 5-10 dargestellt. Nach den sechs Wochen erfolgte eine Trocknungsphase von weiteren sechs Tage in der Klimakammer (20°C, 65 % rel. LF).

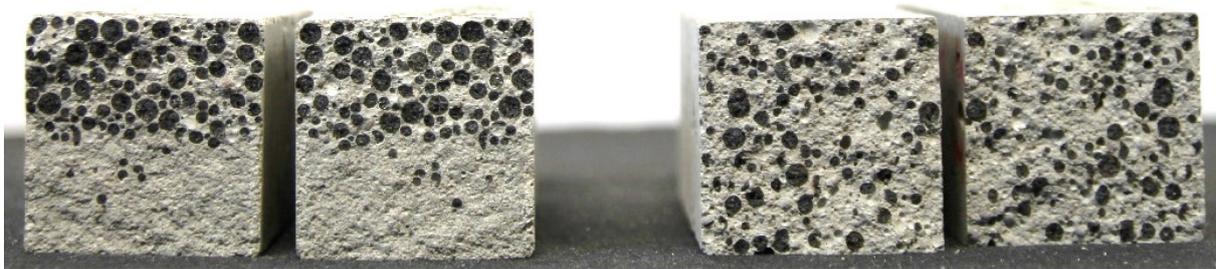


Abbildung 5-8: Querschnitt von Mörtelprismen mit eingebrachten Liapor-Ton-Kugeln. Links: Resultat der Verteilung der Tonkugeln bei Verfüllung der Prismenschalung in einem Arbeitsgang und anschließender Verdichtung. Rechts: Homogene Verteilung, bedingt durch Verfüllung und Verdichtung der Mischung in zwei getrennten Abschnitten.

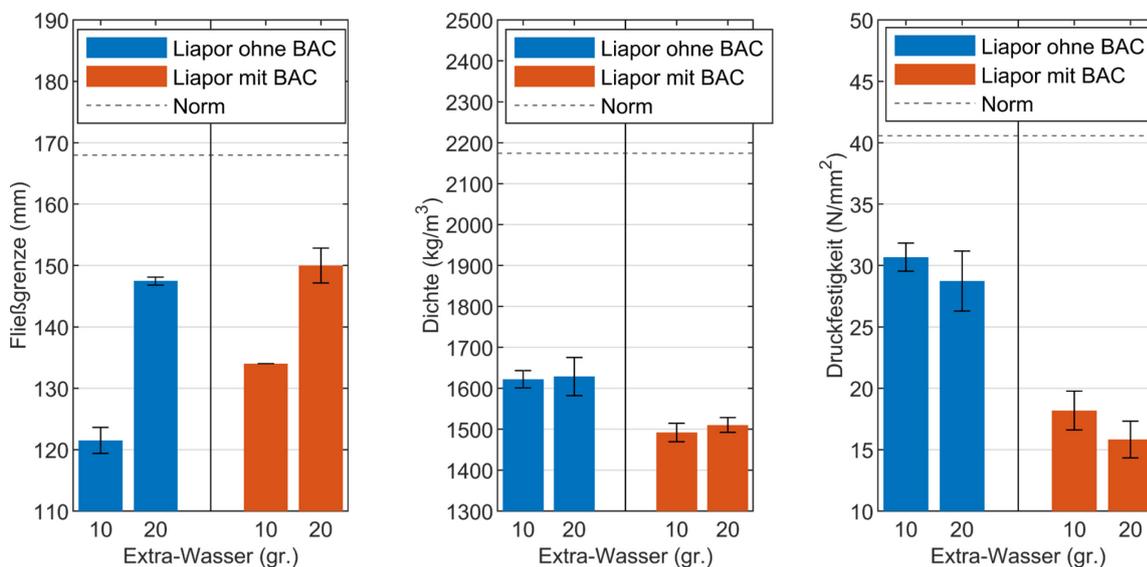


Abbildung 5-9: Fließgrenze (links), Dichte (mitte) und Druckfestigkeit (rechts) für Liapor-Mörtelprismen mit und ohne Bakterien sowie mit unterschiedlichem Extra-Wasser. Die entsprechenden Werte der Normmischung dienen als Referenz.

Exemplarisch werden in dieser Arbeit die Resultate mit jeweils 20 gr. zusätzlichem Wasser dargestellt und diskutiert. Die Ergebnisse aus den 3-P-Biegeversuchen, ersichtlich in Abbildung 5-11, zeigen die Kraft-Rissöffnungsverläufe der einzelnen Testkörper und verdeutlichen die reduzierte Biegezugfestigkeit im Vergleich zu einer Normmörtelmischung (Abbildung 5-7, „initial“). Dabei verringerte sich die maximale Kraftaufnahme der ungeschädigten Mörtelprismen der Referenzprüfserie („Liapor ohne BAC“) im Mittel um ca. 30 % (auf 2198 N), wobei die Testkörper mit einer zusätzlich imprägnierten Bakteriensuspension („Liapor mit BAC“) eine Reduktion um weitere 10 %, auf ca. 40 % (auf 1855 N), aufwiesen. Wird das Hefeextrakt als ausschlaggebender Faktor betrachtet, stimmen auch hier die Resultate mit denen von Schreiberová et al. (2019) überein. Anhand der „Ref“-Testkörper aller Prüfserien zeigt sich im Kurvenverhalten der Trend, dass die reine Wasserlagerung einerseits eine

generell verminderte Maximalbelastung verursachte, aber zugleich, unter Einfluss der bakterienbasierten Suspension, für einen steileren Kurvenanstieg (höheres Biegemodul) sorgte. Dabei könnte die Reduktion der Maximalbelastung auch aus einer verminderten Scherfestigkeit der CFK-Armierung resultieren. Ob die Zunahme der Kurvensteigung aus einer vorzeitigen Aktivierung der Bakteriosporen oder aus den zusätzlichen Nährstoffen resultiert, lässt sich nicht differenzieren.

Weiterführend sind in Abbildung 0-5 und Abbildung 0-6 (Appendix B) die Datenauswertungen für die Prüferie mit 10 gr. zusätzlichem Anmachwasser (Extra-Wasser) gegeben, welche ein nahezu identisches Muster widerspiegeln.



Abbildung 5-10: Versuchsaufbau für Nass-Trockenzyklus für Mörteltestkörper mit Liapor-Ton-Kugeln sowie Hydrogelgranulat.

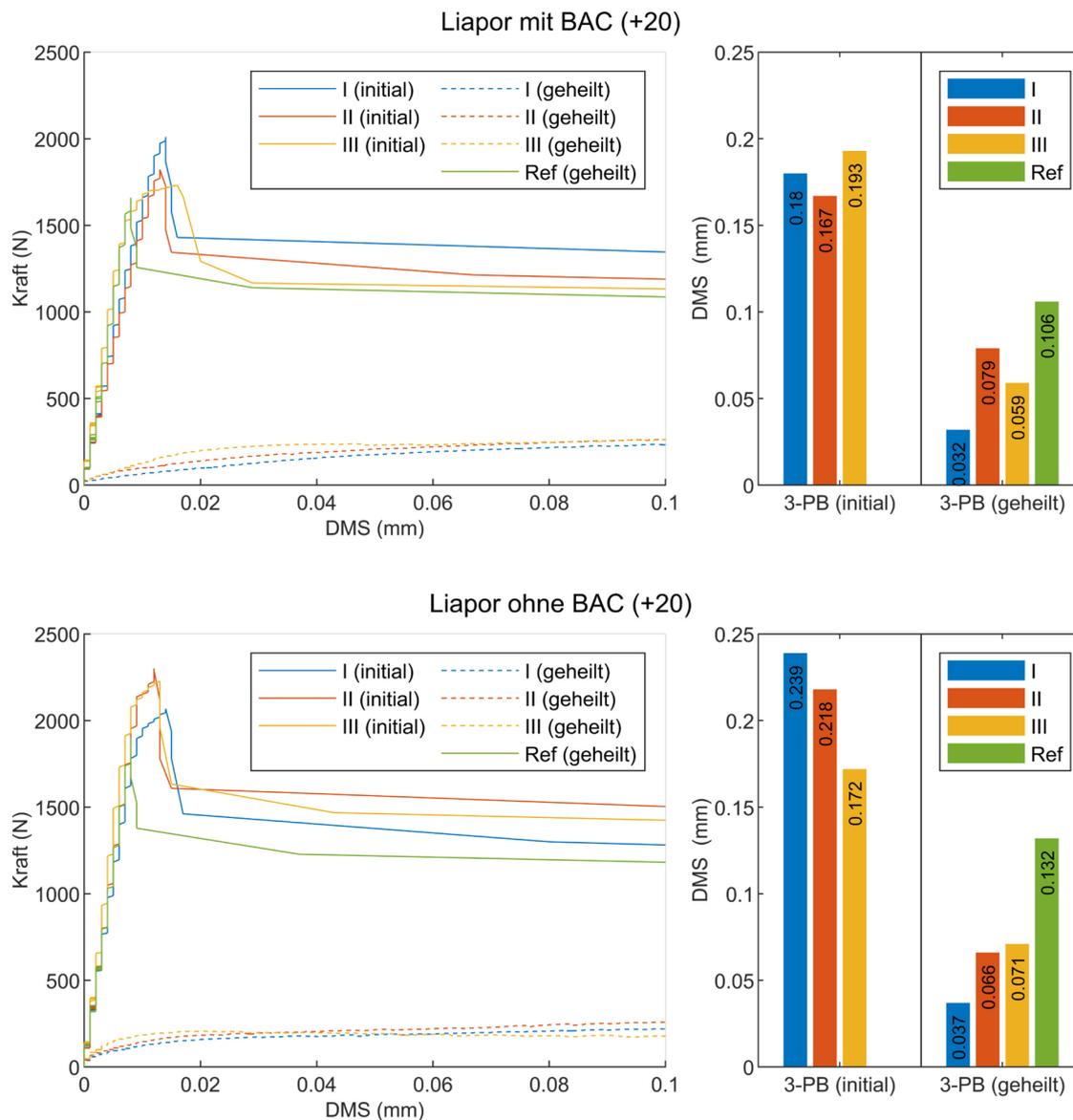


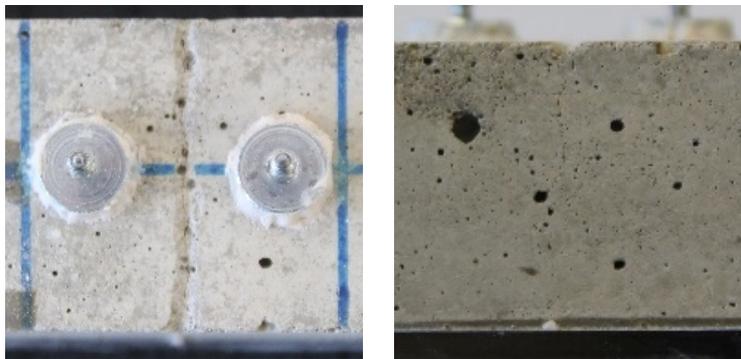
Abbildung 5-11: Detaillierter Kraft-Dehnungs- (Rissöffnungs-) Verlauf für bakterienbasierte Mörteltestkörper (oben) sowie Referenzprüfserie (unten) mit 20 gr. zusätzlichem Wasser des initialen 3-Punkt-Biegeversuch (= Anfangsbelastung) und nach 6-wöchigem Nass-Trockenzyklus mit anschließender Trocknung (= Wiederbelastung). Das Balkendiagramm gibt die finalen Rissweiten in den jeweiligen Zuständen wieder.

Wie bereits in Kapitel 2.3 erwähnt, wurde bei diesem Versuchsaufbau nicht von einer kraftschlüssigen Rissverschließung ausgegangen. Eine Aussage über den Effekt bzw. die Effizienz der Heilungsphase lässt sich folglich über eine Betrachtung der maximalen Wiederbelastung mittels 3-P-Biegeversuch und armierten Mörtelprismen nicht treffen.

Bei oberflächlicher Betrachtung der Rissfraktur eines Mörtelprismas mit imprägnierten Liapor-Tonkugeln sowie eines Prismas aus der Referenzprüfserie ist kein offensichtlicher Unterschied erkennbar (Abbildung 5-12). An einzelnen Stellen, bei denen die Rissflanken sehr dicht beieinanderlagen, bildeten

sich weiße Calciumcarbonat-Ablagerungen. Dies galt jedoch für alle untersuchten Mörtelprismen. Nach Abschluss der Versuchsdurchführung wurden die Prismen vollständig gebrochen und mit Phenolphthalein besprüht, um die Carbonatisierungsfront zu bestimmen. Exemplarisch sind in Abbildung 5-13 für die Prüfserien „Liapor mit/ohne BAC“ jeweils zwei Testkörper mit behandelter Rissflächen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Carbonatisierungsfront überwiegend von der Rissöffnung am stärksten ins Innere vordringt. Dabei lässt sich kein deutlicher Kontrast zu den Referenztestkörpern erkennen. Vielmehr schwanken die Resultate zugleich innerhalb einer Mörtelprüfserie. Ähnlich zu den Ergebnissen von Tan (2019) ergeben sich daraus mehrere mögliche Schlussfolgerungen: Die Rissstruktur verhinderte eine vollständige Wassersättigung aller Testkörper, eine bakterienbasierte Rissverschließung im Inneren fand nicht statt, da die Bakterien ausgewaschen bzw. an die Oberfläche transportiert wurden, oder die Menge an aktivem Heilmittel nicht ausgereichte.

Liapor mit BAC (+20)



Liapor ohne BAC (+20)

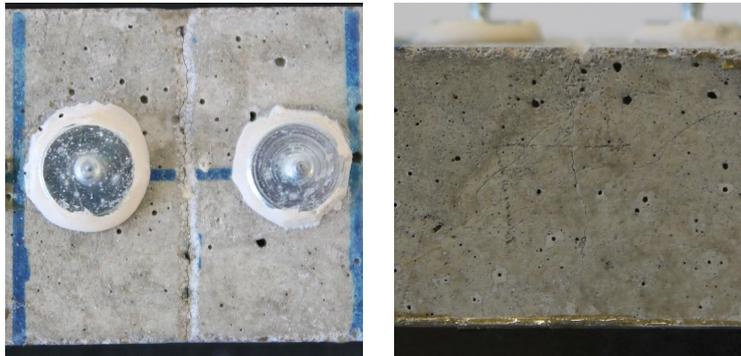
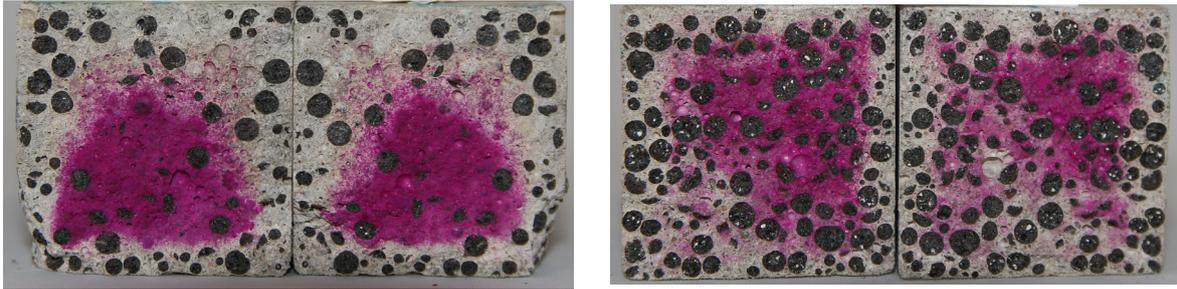


Abbildung 5-12: Optischer Vergleich der oberflächlichen Rissfraktur des Mörteltestkörper III der Prüfserie „Liapor mit BAC“ (oben) sowie des Testkörpers III der Referenzprüfserie „Liapor ohne BAC“ (unten) nach Abschluss des 6-wöchigen Nass-Trockenzyklus. Jeweils links: Unterseite mit Kerbe; rechts: Seitenansicht mit Kerbe oben.

Liapor mit BAC (+20)



Liapor ohne BAC (+20)

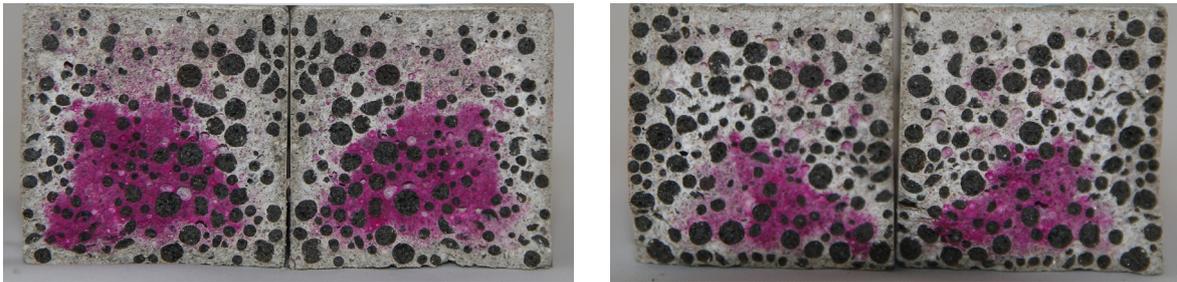


Abbildung 5-13: Optischer Vergleich des carbonatisierten Rissquerschnittes von jeweils zwei Mörtelprismen der Prüfsreihe „Liapor mit BAC“ (oben) sowie der Referenzprüfsreihe „Liapor ohne BAC“ (unten) nach Abschluss des 6-wöchigen Nass-Trockenzyklus. Zur Identifikation der Carbonatisierungseindringtiefe wurden die Rissflächen mit Phenolphthalein eingesprüht. Die Rissöffnung befindet sich, identisch zur Lagerungsposition während der Heilungsphase, oberseitig.

### Hydrogele (SAP)

Das stark wasserabsorbierende Hydrogelgranulat SAP FLOSET CC 27 dient in der Zement- und Bauindustrie bevorzugt als hochwirksames wasserreduzierendes Zusatzmittel. Aufgrund der kommerziellen Verfügbarkeit wird es mittlerweile auch zunehmend in der Erforschung von nachhaltigen und dauerhaften zementgebundenen Werkstoffen [Pelto et al. 2017] angewandt. Die Auswirkungen der SAPs auf die betontechnologischen Materialkennwerte und das mikrostrukturelle Gefüge sind bereits zahlreich publiziert worden [Gruyaert et al. 2016b, Klemm et al. 2013, Krafcik et al. 2017, Olawuyi et al. 2014, Olawuyi et al. 2013, Snoeck et al. 2014]. Dennoch variieren die Schlussfolgerungen stark, da sich meist die Zuschlagsmengen, die Herstellerfabrikate oder die Verkapselungstechniken unterscheiden. Dieses komplexe Zusammenspiel wirkt sich sehr empfindlich auf das Materialgefüge und die Wirkungsweise aus [Klemm et al. 2013, Lee et al. 2010]. Daher ist es umso bedeutender eine explizite Analyse der Materialeigenschaften zu offerieren. Ein weiterer Aspekt hinsichtlich der eingesetzten zerstörungsfreien Prüftechniken ist, dass sich mit dem SAP FLOSET CC 27 keine Referenztestkörper mit nahezu identischen betontechnologischen Eigenschaften herstellen lassen. Ein direkter Vergleich mit konventionellen autogenen Heilungseffekten ist daher nicht möglich.

Tabelle 5-4: Mischungsentwurf für Mörteltestkörper mit unterschiedlichen Dosierungen an eingebrachten SAP-Partikeln für eine verstärkt autogene Heilung .

		SAP 2,25 gr.			SAP 4,5 gr.		
	d/D	Menge (g)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Menge (g)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Volumen (cm <sup>3</sup> )
<b>CEM I 42,5 N</b>		450	3,17	141,96	450	3,17	141,96
<b>Sand</b>	0/2	1350	2,65	509,43	180	2,65	509,43
<b>SAP</b>		2,25			4,5		
<b>Wasser</b>		225	1	225	225	1	225
<b>Gesamt</b>		2027,25			2029,5		1007,34
<b>Extra-Wasser</b>		<b>40/50/60</b>	<b>1</b>	<b>40/50/60</b>	<b>90/110/130</b>	<b>1</b>	<b>90/110/130</b>

Um die Anzahl an Einflussparametern möglichst gering zu halten und den Fokus auf die Validierung der Anwendbarkeit der zerstörungsfreien Prüfung auszurichten, wurden unterschiedliche Dosierungen mit verschiedenen Wassergehalten bei gleichem SAP-Typ hergestellt (Tabelle 5-4). Die Anpassung des Wassergehalts orientierte sich dabei sowohl am Quellverhalten der Granulatdosierung als auch an der Verarbeitbarkeit des Frischmörtels. Die betontechnologischen Materialkennwerte sind in Abbildung 5-14 aufgeführt. Es zeigt sich, dass sich mit zunehmendem Granulatgehalt sowie zusätzlich notwendiger Wassermenge eine verminderte Druckfestigkeit und Materialdichte ergibt. Allerdings wird erst mit der größten Menge an Extra-Wasser eine normbasierte Fließgrenze erreicht. Grund hierfür ist die sofortige Absorption des Anmachwassers während der Frischmörtelherstellung aufgrund fehlender Verkapselung bzw. Modifikation des Granulats.

Für die Heilungsphase wurde, identisch zur bakterienbasierten Selbstheilung, ein Versuchsaufbau (vgl. Abbildung 5-10) mit 6-wöchigem Nass-Trockenzyklus (12 h-Rhythmus) gewählt.

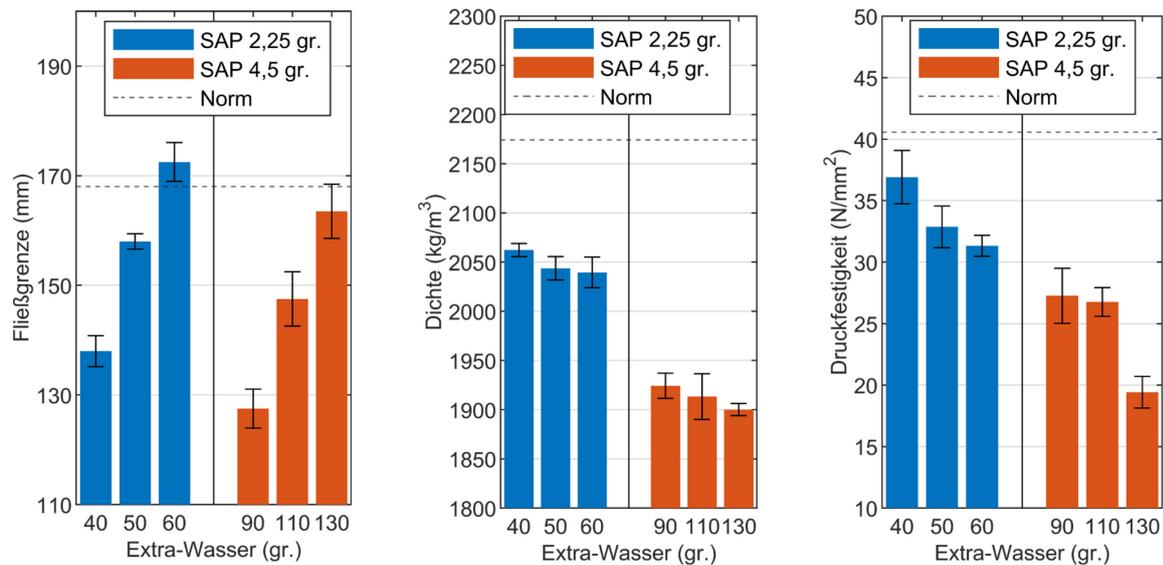


Abbildung 5-14: Fließgrenze (links), Dichte (mitte) und Druckfestigkeit (rechts) für Liapor-Mörtelprismen mit und ohne Bakterien sowie mit unterschiedlichem Extra-Wasser. Die entsprechenden Werte der Normmischung dienen als Referenz.

Aus den Wiederbelastungskurven („geheilt“) der verschiedenen Rezepturen lässt sich kein Trend einer differenzierbaren Heilungseffizienz ablesen (Abbildung 5-15). Allerdings ist auffällig, dass die ungerissenen Referenztestkörper („Ref“) nach dem Nass-Trockenzyklus („geheilt“) eine geringere maximale Kraftaufnahme aufweisen als die Testkörper I-III während der initialen Belastung. Diese Resultate stehen zunächst im Widerspruch zu versuchsähnlichen Messungen von Gupta (2018b). Demnach müsste die zusätzliche Wasserlagerung zu einer verstärkten Carbonatisierung und damit zu einer erhöhten Festigkeit führen. Hier muss allerdings berücksichtigt werden, dass die maximale Zugbelastung im initialen Zustand auf die Verbundwirkung der angeklebten CFK-Armierung zurückzuführen war. Eine mögliche Erklärung könnte daher eine Schwächung der Klebeverbindung der CFK-Lamellen aufgrund der 6-wöchigen Wasserlagerung sein. Unter Berücksichtigung der Belastungswerte weiterer SAP-Rezepturen<sup>22</sup> (Abbildung 0-6, Appendix B) sowie die der bakterienbasierten „Ref“-Testkörper würde eine Reduzierung der Scherfestigkeit des Lamellenverbundes bestätigen. Eine zusätzliche Einlagerung von unverstärkten Mörtelprismen (oder -Würfeln) für einen Vergleich von Druckfestigkeiten vor und nach der Heilungsphase würde diesen Einflussfaktor analysieren helfen.

<sup>22</sup>in dieser Arbeit nicht weiterführend aufgeführt

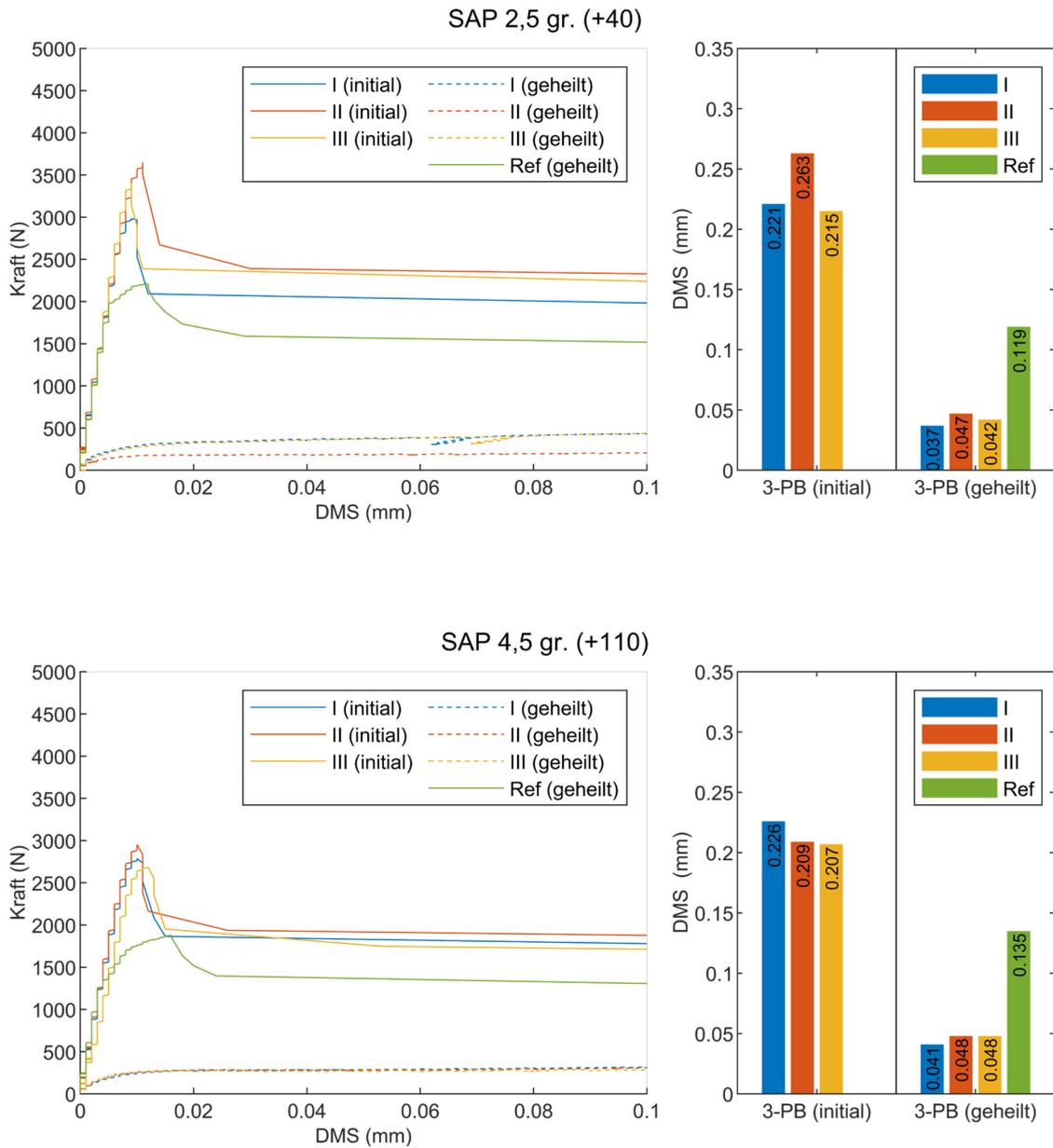


Abbildung 5-15: Detaillierter Kraft-Dehnungs- (Rissöffnungs-) verlauf für Mörteltestkörper mit 2,25 gr. Hydrogelgranulat und 40 gr. zusätzlichem Wasser (oben) sowie Mörtelprismen mit 4,5 gr. Hydrogelgranulat und 110 gr. zusätzlichem Wasser (unten) des initialen 3-Punkt-Biegeversuch (=Anfangsbelastung) und nach 6-wöchigem Nass-Trockenzyklus mit anschließender Trocknung (=Wiederbelastung). Das Balkendiagramm gibt die finalen Rissweiten in den jeweiligen Zuständen wieder.

## 5.2 Ultraschall

Für eine qualifizierte Validierung der Ultraschalltechnik zur Detektion von Risschädigungen sowie anschließender Rissverfüllungen mit Polyurethan oder Calcit fördernden Heilmitteln, konnten variierende Messsetups mit unterschiedlichen Auswerteparameter aufgestellt werden. Aufgrund der geringen Ankopffläche für die vorhandenen US/SE-Kontaktsensoren (Typ Panametrics) an standardisierten Mörtelprismen, lieferten punktkontaktbasierte KRNB-PC Sensoren (Kapitel 4.4) als Geber und Empfänger eine passende Alternative. Der Messaufbau ist in Abbildung 5-16 dargestellt. Die

Verwendung des systembasierten analogen Vorverstärkers (KRN AMP-4/12BB-J) beschränkte die maximale Verstärkung des Eingangssignals auf 27 dB. Ebenfalls wurde die Ausgangsleistung des Gebersignals durch die technischen Eigenschaften des Hochspannungs-Leistungsverstärkers „Trek Model PZD350A“ (TREK INC., USA) beschränkt. Um die Impulssignale möglichst formstabil und zugleich amplitudenstark ausgeben zu können, war die Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Impulsform auf Werte zwischen 259 Volt (Sinus: 300 kHz) und 413 Volt (Rechteckpuls: 4  $\mu$ s) beschränkt. Aufgrund der maximalen Gebersignalverstärkung haben sich die generierten Impulssignale in ihrer Form verändert (Abbildung 0-7, Appendix B). Als Datenerfassungssystem diente ein TPCE-Transientenmessmodul mit TranAX-Software (Elsys AG, CH) sowie für das In-situ-Monitoringverfahren ein USB-Oszilloskop HS4 (TiePie engineering, NL) mit firmeneigener Software.

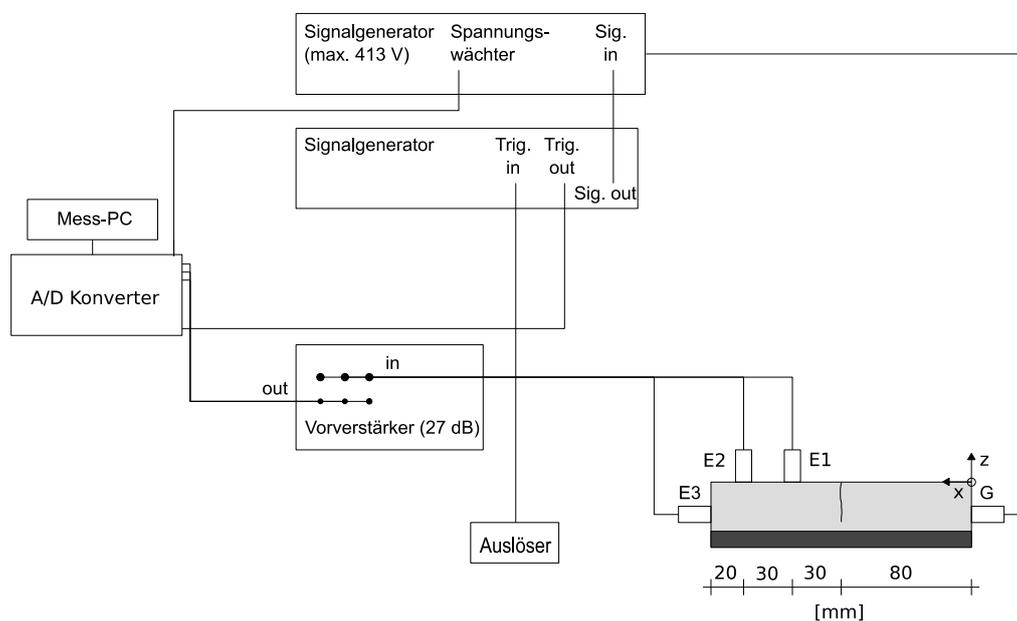


Abbildung 5-16: Experimenteller Messaufbau für Ultraschalltransmissionsmessungen an Mörteltestkörpern mit Selbstheilungseigenschaften.

Eine exemplarische Reproduzierbarkeit der Signalform an den drei unterschiedlichen Empfängerpositionen (E1-E3) ist in Abbildung 4-11 dargestellt. Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, erschweren die Ankopplungsbedingungen und filigranen Kontakteigenschaften des KRN-Sensors eine reproduzierbare amplitudentreue Signalformgenerierung an porösen Oberflächen. Neben der Glättung der Ankopplfläche mit Epoxidharz wurden zudem, auf Basis einer Normierung auf den Maximalwert des jeweiligen Signals, Signalparameter wie Ersteinsatzzeit, Centroid Time und Centroid Frequency mit unterschiedlichen Anregerimpulsen (Rechteck: 2/4  $\mu$ s, Sinus: 100/200/300 kHz) evaluiert. Während der Versuchsdurchführung hatte sich für Empfänger E2 die geeignetste Sensor-Geberkombination ergeben, welche die deutlichsten Differenzen zwischen den einzelnen Zuständen charakterisiert. Daher wird in diesem Kapitel 5.2 ausschließlich auf die Ergebnisse von Empfänger E2 Bezug genommen.

### 5.2.1 Ersteinsatzzeit

Mit Hilfe der Kompressionswelle, welche die höchste Schallausbreitungsgeschwindigkeit im viskoelastischen Medium besitzt, lässt sich dieser Signalparameter als geeignetes Werkzeug für eine Beschreibung der Materialeigenschaften sowie von Materialschädigungen verwenden. Die Aktivierung der unterschiedlichen verwendeten Heilungsmittel soll nach den entsprechenden Heilungszyklen eine Rissverschließung bewirken. Wie in Kapitel 4.1.1/4.1.2 aufgezeigt, hängt die Zuverlässigkeit der Bestimmung der Ersteinsatzzeit einerseits von der Messtechnik/Messkette und andererseits von den individuellen strukturellen Materialgegebenheiten jedes einzelnen Testkörpers ab. Erst die Verknüpfung beider Einflussfaktoren und deren statistische Betrachtung erlaubt eine zuverlässig differenzierte Aussage über die Heilungseffizienz. Ein Aufsummieren von 100 Einzelsignalen verbesserte zudem das S/N-Verhältnis. Die Genauigkeit der Ersteinsatzbestimmung mittels AIC-Picker ist in Abhängigkeit der notwendigen Eingabeparameter im ungeschädigten Zustand (initial) auf circa 50 Samples ( $2,5 \mu\text{s}$ ) evaluiert worden.

#### SLV

Abbildung 5-17 zeigt die automatisiert bestimmten Ersteinsätze an E2 unter Berücksichtigung der Standardabweichung über die verschiedenen Impulsanregungen. Auffällig ist, dass alle Ersteinsatzzeiten, sowohl für alle vier Testkörper als auch für alle individuellen Zustände, sich im Bereich zwischen  $31\text{-}33 \mu\text{s}$  bewegen. Dies entspricht einer Schallausbreitungsgeschwindigkeit von circa  $4260\text{-}4500 \text{ m/s}$ , welche z. B. bereits zuvor von Müller (2015) als P-Wellengeschwindigkeit bei gleicher Rezeptur und Herstellungsweise identifiziert wurde. Da jedoch die Differenzen zwischen den einzelnen Zuständen im Bereich der Standardabweichung sowie im Rahmen der Pickgenauigkeit ( $2,5 \mu\text{s}$ ) mit dem AIC-Kriterium liegen, lassen sich die Zustände über die Erstankunftszeit nicht voneinander abgrenzen.

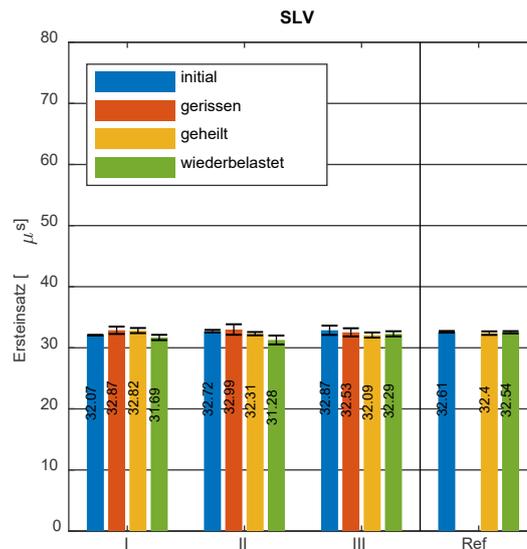


Abbildung 5-17: Gemittelte Ersteinsätze (mit Standardabweichung) für Empfänger E2 über verschiedene Impulsanregungen (Rechteck:  $2/4 \mu\text{s}$ , Sinus: 100/200/300 kHz) zu jedem Zustand während des Versuchablaufs für Mörteltestkörper mit manuell induziertem Polyurethan HA Flex SLV AF.

## Bakterien

Im Vergleich zur Normsandmischung bildet die modifizierte Rezeptur für die bakterienbasierte Selbstheilung durch die sehr offenporigen Liapor-Tonkugeln ein sehr inhomogenes mikrostrukturelles Gefüge. Dies wirkt sich neben der Abnahme der Schallausbreitungsgeschwindigkeit (ca. 10-25 %) auch auf die Zunahme der Standardabweichungen innerhalb der unterschiedlichen Anregerimpulse aus (Abbildung 5-18). Dies ist bei der Testserie „Liapor mit BAC“ am stärksten ausgeprägt.

Auch wenn die Differenzen nur sehr gering sind, scheint die Wasserlagerung eine Verkürzung der Schallwellengeschwindigkeit hervorzurufen. Das offenbaren die ungeschädigten „Ref“-Testkörper beider Prüfserien. Jedoch weisen die imprägnierten Mörtelprismen nach der Heilungsphase einen sehr offensichtlichen Rückgang der Schalllaufzeit auf, welcher sich von der Referenzserie „Liapor ohne BAC“ zuverlässig abgrenzen lässt. Insgesamt können die Ergebnisse jedoch nicht als konsistent schlüssig bewerten werden, sondern geben vielmehr einen Trend wieder. Besonders die teilweise erhöhte Schalllaufzeit nach einer Risschädigung äußert sich als konträres Muster. Daher müssen für eine qualitative als auch quantitative Beurteilung der Heilungseffizienz neben einer Reduzierung der systematischen Messfehler eine höhere Anzahl an Testkörpern untersucht werden.

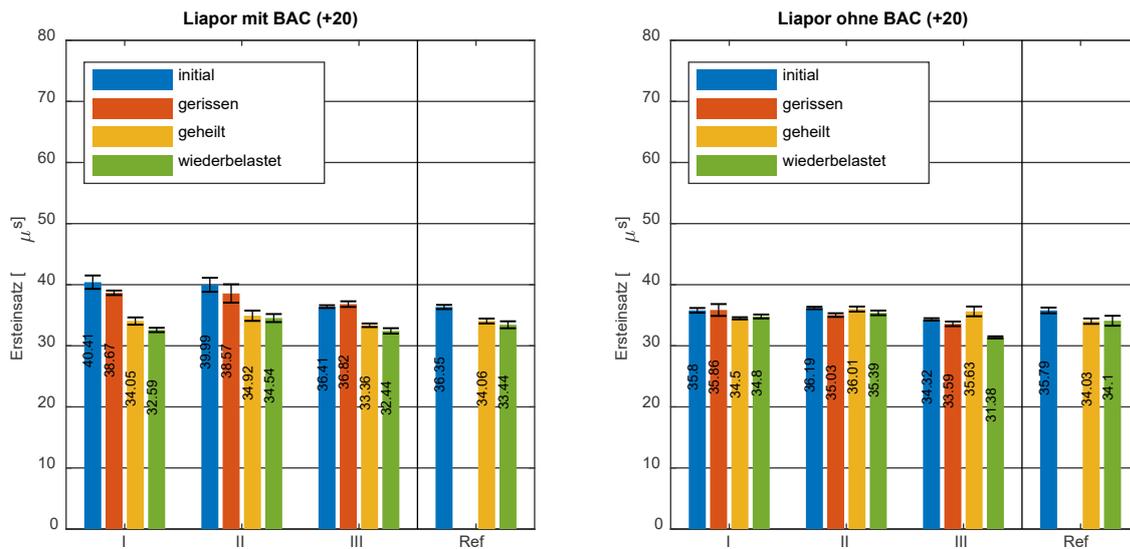


Abbildung 5-18: Gemittelte Ersteinsätze (mit Standardabweichung) für Empfänger E2 über verschiedene Impulsanregungen (Rechteck: 2/4  $\mu\text{s}$ , Sinus: 100/200/300 kHz) zu jedem Zustand während des Versuchablaufs für Mörteltestkörper mit imprägnierten Liapor(Ton)-Kugeln (links) und ohne (rechts) .

## Hydrogele

Eine signifikante Einflussnahme von unterschiedlicher Dosierungen des Hydrogelgranulats sowie der zusätzlich hinzugegebenen Wassermengen auf die Schallausbreitungsgeschwindigkeit, dargestellt in Abbildung 5-19, ist nicht erkennbar. Die doch sehr abweichenden betontechnologischen Kennwerte (Abbildung 5-14) zwischen den Prüferien mit 2,25 gr. und 4,5 gr. Granulat scheinen entweder keinen Einfluss auf die Schalllaufzeit zu haben oder lassen sich mit dem Messaufbau nicht detektieren. Sowohl im initialen als auch im geheilten Zustand ergaben sich nahezu identische Messwerte.

Wie bereits bei den Ref-Testkörpern mit Liapor-Tonkugeln festgestellt, führt die Wasserlagerung der SAP-Testkörper zu einer Erhöhung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit. Dieser Effekt wird mit Hydrogelen noch einmal intensiviert und resultiert offensichtlich aus einer nano- bzw. mikrostrukturellen Materialveränderung, welche auf eine Kombination aus zusätzlicher Hydratisierung, puzzolanischer Aktivität und einer Kristallisation von Calciumcarbonat zurückzuführen ist [Snoeck et al. 2016].

Da sich die Schalllaufzeiten der geschädigten Mörtelprismen nicht signifikant unterscheiden bzw. sogar reduzierte Werte aufweisen, kann eine Rissverschließung nicht über den Ersteinsatz detektiert werden.

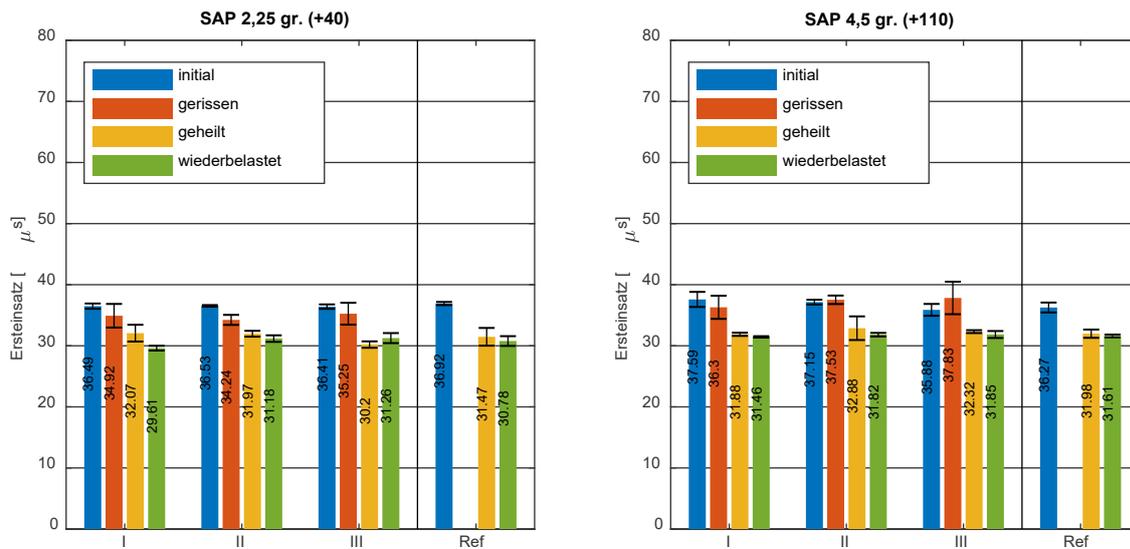


Abbildung 5-19: Gemittelte Ersteinsätze (mit Standardabweichung) für Empfänger E2 über verschiedene Impulsanregungen (Rechteck: 2/4 µs, Sinus: 100/200/300 kHz) zu jedem Zustand während des Versuchablaufs für Mörteltestkörper mit Hydrogelen und zusätzlichem Anmachwasser (links: +40 gr., rechts: +110 gr.).

### 5.2.2 Centroid Time/Centroid Frequency

Die Schwerpunkt-Zeit  $A_t$  (Centroid Time) ist ein Signalparameter im Zeitbereich  $t$ , welcher den Zentroid der Gesamtenergiebilanz der Wellenform  $g(t)$  markiert:

$$A_t = \frac{\int_{t_0}^{t_1} t \cdot g(t) dt}{\int_{t_0}^{t_1} g(t) dt} \tag{Gl. 5-1}$$

Im Gegensatz dazu erfolgt die Bestimmung der Schwerpunkt-Frequenz (Centroid Frequency) im Frequenzbereich:

$$A_f = \frac{\int_{f_0}^{f_1} f \cdot g(f) df}{\int_{f_0}^{f_1} g(f) df} \tag{Gl. 5-2}$$

Beide spektrale Parameter sind amplitudenunabhängig und dienen einer quantitativen Analyse der Ultraschalldaten. Sie beschränken sich lediglich auf die eingebundene Signallänge bzw. auf den selektierten Frequenzbereich. Besonders die Centroid Frequency wird häufig für eine Materialcharakterisierung verwendet, da sie relativ robust gegen Signalrauschen ist und Informationen über das strukturelle und materialspezifische Dämpfungsverhalten liefert [Antonaci et al. 2012, Kim et al. 2012, Moradi-Marani et al. 2014, Vergara et al. 2004, Vergara et al. 2001]. Für die Centroid Time wurde eine Signallänge von 500 µs, beginnend ab Impulsaussendung, gewählt. Basierend auf einer Kohärenzanalyse der Signale aus dem Test auf Reproduzierbarkeit (Abbildung 4-11) wurde für die

Centroid Frequency ein Frequenzbereich zwischen 20-300 kHz gewählt. Da dieser Frequenzbereich vom KRN-Sensoren sehr amplitudenstabil übertragen wird, können materialabhängige Inhomogenitäten und frequenzbasierte Veränderungen sensitiv erfasst werden [Gong et al. 2014, Landis et al. 1995]. Im Folgenden sind die Ergebnisse für die Position an Empfänger E2 mit einer 2  $\mu$ s-Einzelimpulsanregung dargestellt. Die Angabe einer Standardabweichung war in diesem Falle nicht möglich, da jeweils nur eine Messung (Mittelwert aus 100 Einzelpulsen) je Zustand durchgeführt wurde.

## SLV

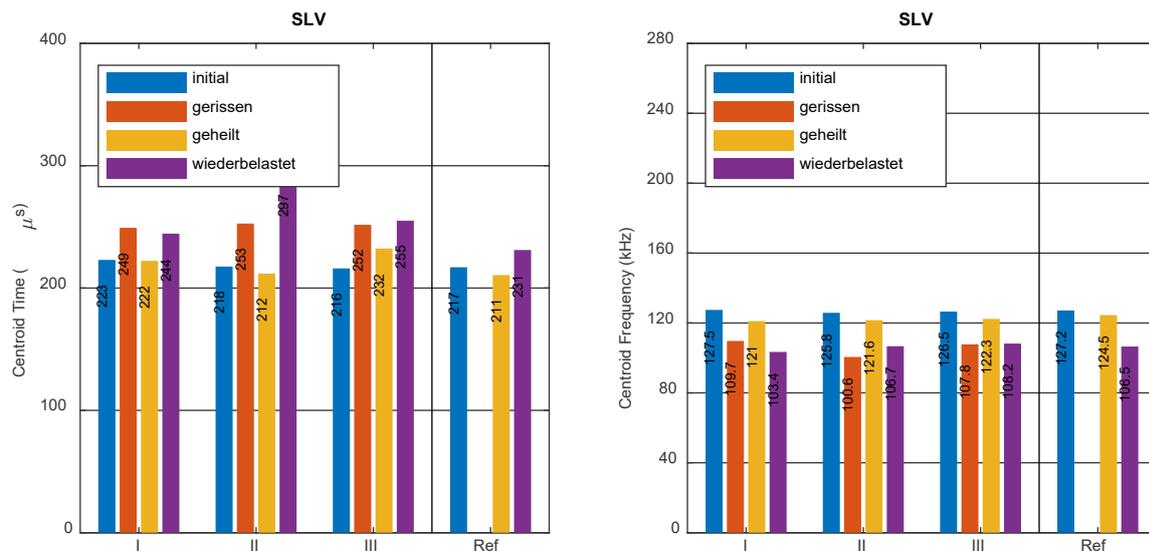


Abbildung 5-20: Centroid Time (links) und Centroid Frequency (rechts) für Mörteltestkörper mit manueller Heilung („SLV“) bei 2  $\mu$ s-Einzelimpulsanregung, berechnet für Empfänger E2.

Die Centroid Time beträgt für alle ungeschädigten Mörtelprüfkörper („initial“) im Mittel 219  $\mu$ s ( $\pm 9$   $\mu$ s) und steigt nach der Rissinitiierung durchschnittlich um 26  $\mu$ s ( $\pm 5$   $\mu$ s) an. Der Schwerpunkt der Referenzprobe fällt leicht über die Dauer von vier Tagen (Aushärtezeit für die Testkörper „SLV I-III“) sowie unter dem Einfluss einer Sensorneuankopplung um -6  $\mu$ s. Dieser Wert kann als Abschätzung für eine Betrachtung auf Reproduzierbarkeit innerhalb dieser Messkette gesehen werden (vgl. Abbildung 4-11, Kapitel 4.4). Während die Testkörper „SLV I/II“ nach der Heilung einen Rückgang auf die initialen Ausgangswerte aufweisen, reduziert sich die Centroid Time für Testkörper „SLV III“, welcher nur eine minimale Verfüllung in Oberflächennähe erfährt, nur gering. Wird die zeitliche Differenz zwischen „initial“ und „geheilt“ des „Ref“-Testkörpers als zuverlässig angenommen, könnte mit der Centroid Time eine qualitative Unterscheidung der Heilungseffizienz durchgeführt werden. Ob dies auch quantitativ möglich ist, müsste anhand einer ausgedehnten Prüferie validiert werden. Eine Schädigung der geheilten Prismen durch einen zweiten 3P-Biegeversuch führt zu einem erneuten deutlichen Anstieg der Centroid Times und suggeriert einen vorherigen Heilungseffekt.

Die Centroid Frequency weist, parallel zur Centroid Time, ein ähnliches Muster auf. Im initialen Zustand liegt die Centroid Frequency durchschnittlich bei 109,4 kHz ( $\pm 3,7$  kHz) und fällt mit einer

Rissinitiierung der Testkörper um 20,6 kHz. Die anschließende Rissverfüllung und Aushärtung lässt die Centroid Frequency bis nahe der initialen Anfangswerte ansteigen. Dies gilt sowohl für die nach einer visuellen Betrachtung vollständig verfüllten Mörtelprisma I und II als auch für Prisma III, welches nur im oberen Kerbenbereich eine partielle Schließung erfuhr. Unter Berücksichtigung der Schwankung der Centroid Frequency des „Ref“-Testkörper von 3 kHz (zwischen initial und geheilt) ist allerdings eine qualitative bzw. quantitative Unterscheidung der Heilungseffizienz zwischen einem vollständig verfüllten Riss und einer partiellen Schließung in diesem Fall nicht eindeutig möglich. Wird schließlich der kraftschlüssige Verbund bei einer Wiederbelastung zerstört, sinkt die Frequenz auf Werte ähnlich der im gerissenen Zustand. Mit dieser spektralen Analyse lässt sich dennoch neben der Rissverfüllung auch eine Risschädigung eines zementgebundenen Werkstoffes im initialen Zustand als auch eine Schädigung eines kraftschlüssigen Verbundes durch Polyurethan qualitativ nachweisen.

### Bakterien

Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22 zeigen den direkten Vergleich der berechneten Centroid Times und Centroid Frequencies zwischen Mörtelprismen mit imprägnierten Liapor-Tonkugeln sowie der Referenzprüfserie ohne Bakterien mit jeweils 20 gr. zusätzlichem Wasser. Hinsichtlich der Untersuchung auf eine erhöhte Heilungseffizienz für die bakterienbasierten Mörteltestkörper lässt sich zwischen beiden Prüfserien keine eindeutige Differenzierung mit der Centroid Times als auch mit der Centroid Frequency feststellen. Bedingt durch den Nass-Trockenzyklus findet nicht nur eine Zunahme der Frequenz bzw. Abnahme der Schwerpunktzeit der geschädigten Testkörper I-III statt, sondern auch bei beiden ungeschädigten „Ref“-Testkörpern. Eine differenzierte Abgrenzung von den Testkörpern I-III ist nicht möglich. Allerdings zeigt sich, dass die gemessenen Werte für die Mörtelprismen ohne Bakterien in allen Zuständen leicht erhöht sind. Ähnlich zu den bestimmten maximalen Belastungswerten (Kapitel 5.1) scheint die Imprägnierung die akustische Wellenausbreitung zu beeinflussen.

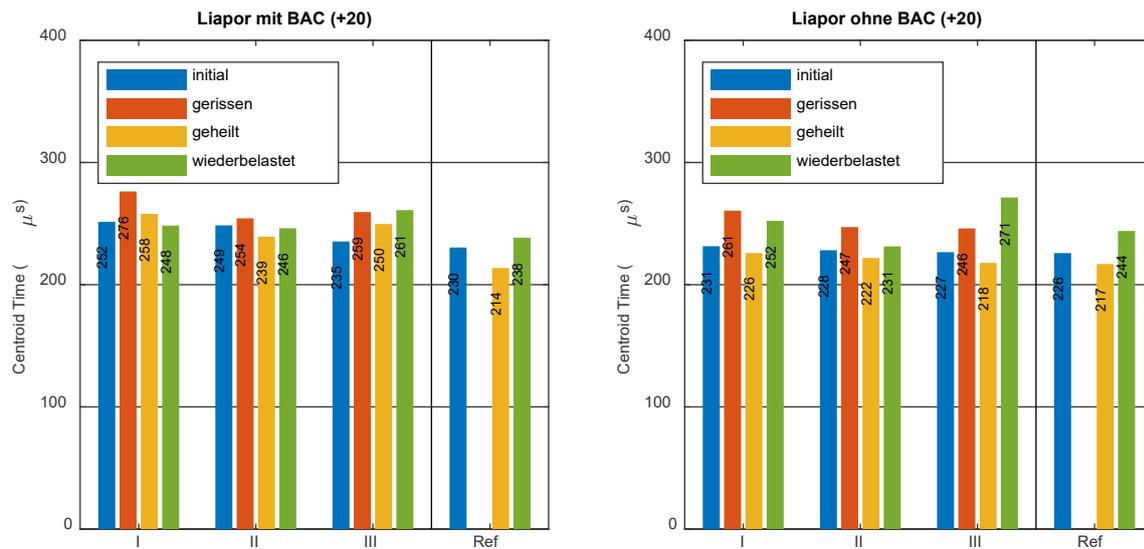


Abbildung 5-21: Centroid Time für Mörteltestkörper mit imprägnierten (links) und nicht-imprägnierten (rechts) Liapor-(Ton)Kugeln für eine bakterienbasierte Selbstheilung bei  $2\mu\text{s}$ -Einzelimpulsanregung für Empfänger E2.

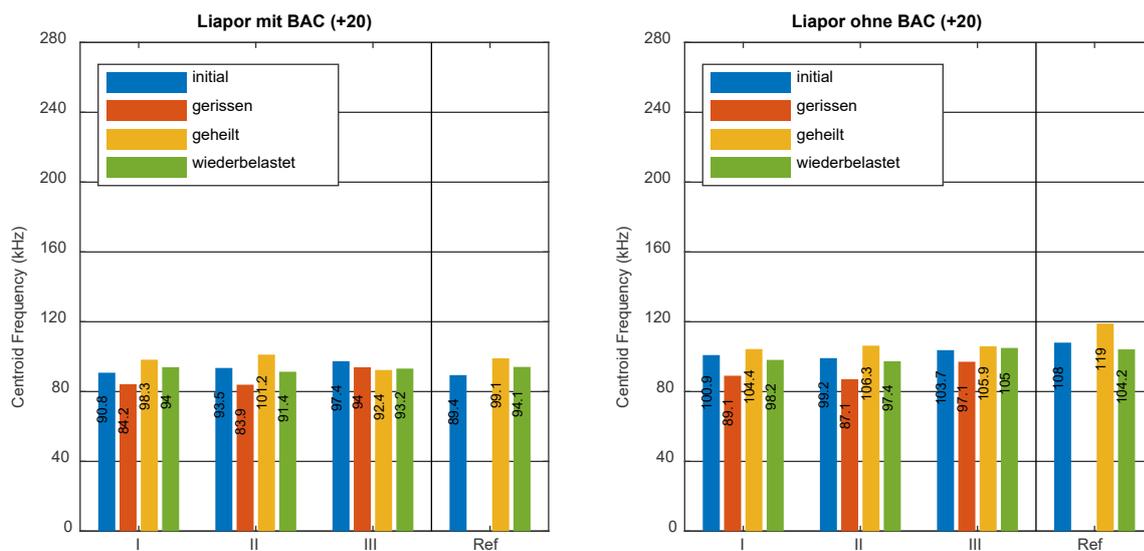


Abbildung 5-22: Centroid Frequency für Mörteltestkörper mit imprägnierten (links) und nicht-imprägnierten (rechts) Liapor-Tonkugeln für eine bakterienbasierte Selbstheilung bei  $2\mu\text{s}$ -Einzelimpulsanregung, berechnet für Empfänger E2.

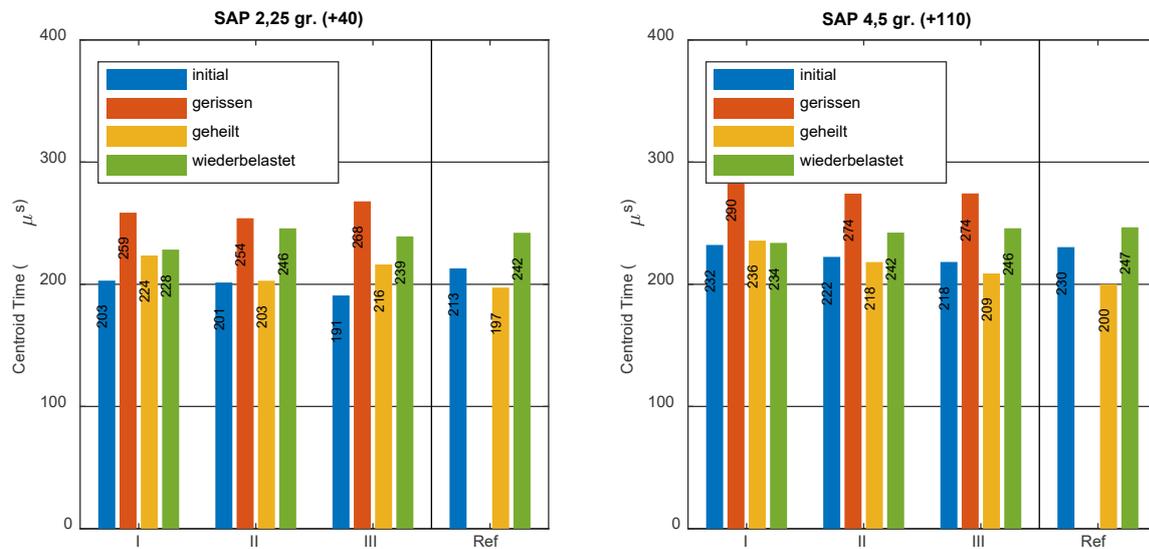
Hydrogele

Abbildung 5-23: Centroid Times für Mörteltestkörper mit 2,5 gr. Hydrogelgranulat (links) plus 40 gr. Extrawasser und 4,5 gr. Hydrogelgranulat (links) mit 110 gr. Extrawasser bei 2 $\mu$ s-Einzelimpulsanregung, berechnet für Empfänger E2.

Die Auswertung der Centroid Times zeigt sehr deutlich, dass sowohl die Rissinitiation als auch die 6-wöchige Heilungsphase einen starken Einfluss auf die gemessenen Zeiten haben. Das gilt für beide aufgeführte Prüfserien in Abbildung 5-23. Da die ungerissenen „Ref“-Testkörper ebenfalls einen Rückgang der Centroid Time nach dem Nass-Trockenzyklus aufweisen, erschwert sich die Beurteilung einer autogen verstärkten Rissverschließung. Allerdings ergibt sich der Trend, dass die Differenzen zwischen dem gerissen und geheilt Zustand der Mörtelprismen I-III die der „Ref“-Testkörper übersteigt und sich wertemäßig an den initialen Zustand angleichen. Besonders offensichtlich ist dieses Verhalten bei der Prüfserie „SAP 4,5 gr. (+110)“. Ob dies aus einer Rissverschließung resultiert oder nur aus einer verstärkten Wassersättigung durch die offene Risszone einhergeht, lässt sich mit dieser Auswertemethode jedoch nicht klären.

Während die Resultate der Centroid Times einem nachvollziehbaren Trend folgen, ergeben die Centroid Frequencies ein zusammenhangloses Muster (Abbildung 5-24). Dies wird besonders beim Vergleich der jeweiligen „Ref“-Testkörper offensichtlich. Während einmal ein Abfall der Frequenz nach der Heilungsphase vorhanden ist, steigt für den anderen Testkörper die Frequenz an. Eine Analyse der einzelnen Signalwellenform der Ultraschalldaten ergab, dass die Resultate in diesem Fall durch Messstöreinflüsse überlagert worden sind. Ein entsprechendes Postprocessing der Rohdaten hat nicht zu einer Verbesserung der Daten geführt.

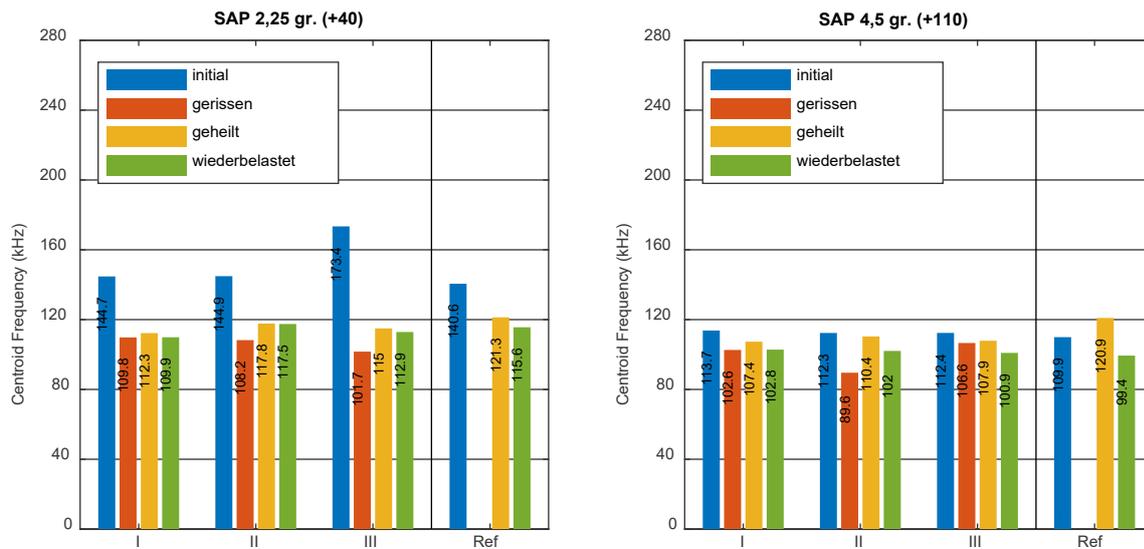


Abbildung 5-24: Centroid Frequency für Mörteltestkörper mit 2,5 gr. Hydrogelgranulat (links) plus 40 gr. Extrawasser und 4,5 gr. Hydrogelgranulat (links) mit 110 gr. Extrawasser bei  $2\mu\text{s}$ -Einzelimpulsanregung, berechnet für Empfänger E2.

### 5.2.3 In-situ-Monitoring

Während in Kapitel 5.2.2 nur die finalen Centroid Times und Centroid Frequencies in den stationären Zuständen angegeben sind, lässt sich mit Hilfe der In-situ-Messung auch das zeitliche Verhalten dieser Auswerteparameter während der Erhärtung des Polyurethans bestimmen. Der Versuchsaufbau entspricht derselben Konfiguration aus Abbildung 5-16. Die Datenauswertung erfolgte über Empfänger E2 mit einer periodischen Impulsanregung von  $\Delta t=2$  min. Die Untersuchung des exemplarisch untersuchten Mörtelprismas „SLV II“ erfolgte aufgrund der sensiblen Mess- und Sensortechnik im Prüflabor und nicht in einer Klimakammer mit stationären Raumklimabedingungen. Der Einfluss von Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen ist folglich nicht ausgeschlossen.

Abbildung 5-25 zeigt die Auswirkungen einer Rissverfüllung sowie der anschließenden Aushärtung des verwendeten Polyurethans über 90 Stunden ( $\approx 3,75$  d). Neben der Centroid Times und Centroid Frequencies ist parallel der Korrelationskoeffizient dargestellt. Alle Messparameter basieren auf einer vorigen Amplitudennormierung. Der Verlauf der Centroid Time zeigt innerhalb der ersten 7 h (0,29 d) zunächst einen steilen Abfall von  $253 \mu\text{s}$  auf ein Minimum von  $201 \mu\text{s}$ . Bis Versuchsende bleibt die Zeit mit einem leicht ansteigenden Gradienten relativ konstant (Ende:  $209 \mu\text{s}$ ). Diese Werte entsprechen den Ergebnissen aus der unabhängig durchgeführten stationären Messdurchführung der Zustände „gerissen“ und „geheilt“ aus Abbildung 5-20. Parallel zur Centroid Time verzeichnet die Kurve der Centroid Frequency ebenfalls in dem Zeitraum der ersten 7 h den steilsten Gradienten. Diese Zeitspanne würde, laut Herstellangabe, ungefähr der chemischen Reaktionszeit<sup>23</sup> entsprechen. Anschließend nimmt die

<sup>23</sup> chemische Reaktionszeit bei  $15^\circ\text{C}$  mit 2% Beschleuniger: ca. 5,1 h (Herstellangabe)

Frequenz innerhalb weiterer 14 h stark zu und flacht erst nach 24 h ab. Da allerdings kein Beschleuniger hinzugefügt wurde, ist eine verlängerte Reaktionszeit nicht ausgeschlossen, was dieses Verhalten bestätigen würde. Vergleichbare Ergebnisse erzielten Garcia Feiteira et al. (2016) mit der Untersuchung der Maximalamplitude an Mörtelprismen. Allerdings zeigte dort das Kurvenverhalten nach den ersten ca. 6-7 h kaum noch relevante Veränderungen.

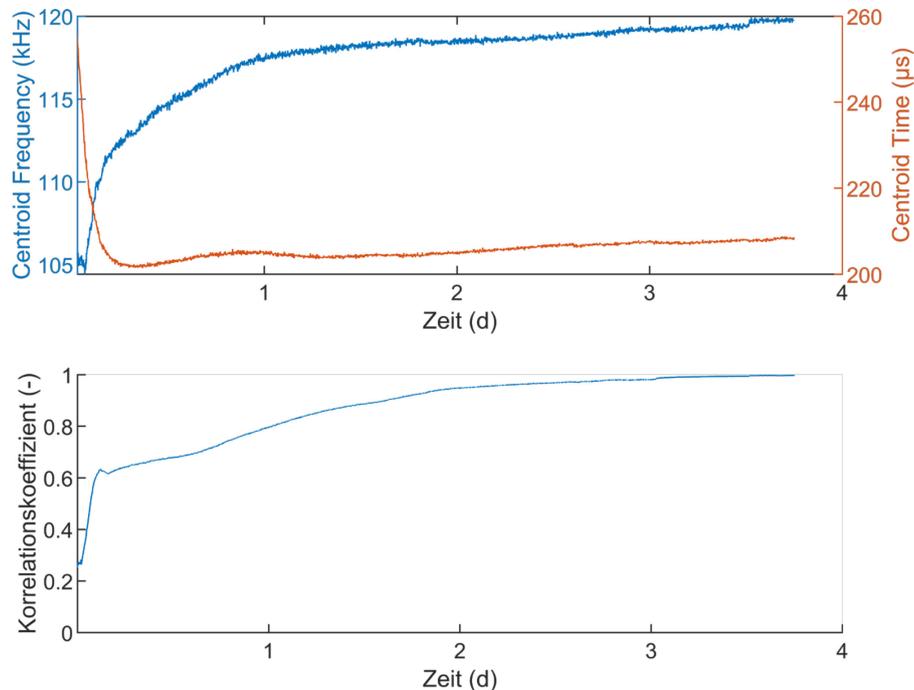


Abbildung 5-25: In-situ-Monitoring des Verfüll- und Aushärteverhaltens mit Ultraschall (2  $\mu$ s-Einzelimpulsanregung für Empfänger E2) von „SLV“ in Mörteltestkörper („SLV II“) über einen Versuchszeitraum von circa 90 h. Oben: Centroid Frequency und Centroid Time. Unten: Korrelationskoeffizient.

Die Ergebnisse der stationären Messung (100,6 kHz/121,6 kHz) und der Anfangs- und Endwerte der In-situ-Messung (104,7 kHz/119,7 kHz), unter Berücksichtigung einer Schwankungstoleranz von  $\Delta f=2,7$  kHz (= Differenz von „initial“ und „geheilt“ des „Ref“-Testkörper), sind nahezu kongruent. Somit kann für diese Auswerteparameter zugleich eine reproduzierbare und nicht systembeeinflussende Sensorankopplung nachgewiesen werden.

Unter Ausschluss von nicht berücksichtigten Randeinflüssen kann geschlussfolgert werden, dass die Centroid Frequency innerhalb der ersten 24 h auf das Verfüll- bzw. Ausbreitverhalten des Polyurethans innerhalb der Rissflanken sowie auf das langfristige Aushärten des Polyurethans „SLV“ reagiert. Da nach 24 h die chemische Reaktion längst abgeschlossen sein sollte, könnten die darauffolgenden sehr ähnlichen Anstiegsgradienten beider Parameter auf äußere Randeinflüsse oder versuchsbedingte Einflüsse zurückzuführen sein. Eine In-situ-Messung an einem über die gleiche Zeitspanne unbeeinflussten Mörteltestkörper ohne Selbstheilungseffekte könnte diese Effekte erfassen.

Der Korrelationskoeffizient tendiert zu einem ähnlichen Kurvenverhalten wie die Centroid Frequency. Mit Beginn der Rissverfüllung kommt es zu einer schnellen Signalveränderung, welche nach circa 2,7 h endet und von einem Kurvenverhalten ähnlich der Centroid Frequency geprägt ist.

### 5.3 Schwingungsanalyse

Die Bestimmung der Resonanz- und Eigenfrequenzen im Grundmodus sowie weiterer Oberschwingungen gibt Aufschluss über die dynamischen Schwingungseigenschaften des angeregten Gesamtsystems. Wie in Kapitel 4.3 aufgezeigt, erlaubt die Schwingungsanalyse einerseits eine Charakterisierung betontechnologischer Materialeigenschaften, sogar mit direktem Bezug zu statischen Parametern, und andererseits ermöglicht sie die Evaluierung lang- und kurzfristiger Veränderungen durch chemische oder physikalische Angriffe, Schädigungen und Lagerungen. Daher wurde für alle Mörteltestkörperkompositionen (Tabelle 5-2) nach der Herstellung der dynamische Elastizitäts- und Schermodul berechnet. Um möglichst vergleichbare betontechnologische Materialkennwerte zu erhalten, wurden die Messungen an Mörtelprismen ohne zusätzliche CFK-Armierung durchgeführt, sodass von einem homogenen und isotropen Körper ausgegangen werden kann. Für die Umrechnung der Resonanzfrequenz in den E- und G-Modul wurde die longitudinale und torsionale Anregungsform nach Gl. 4-17 ff. sowie nach Gl. 4-23 ff. angewandt. Mit der Anbringung der Armierung findet ein starker Eingriff in das Schwingungsverhalten der Testkörper statt, sodass die Voraussetzung eines homogenen isotropen Schwingungskörpers nicht mehr vorliegt. Daher wurden für die Validierung der Heilungseffizienz ausschließlich die ermittelten Resonanzfrequenzwerte sowie die Dämpfungsfaktoren nach Gl. 4-25 angegeben. Die Beziehung zwischen Resonanzfrequenz bzw. Dämpfungsfaktor und Heilung bzw. Schädigung bleibt jedoch die gleiche; mit Abnahme der Schwingungsfrequenz und Erhöhung des Dämpfungsfaktors wird von einer zunehmenden Materialschwächung ausgegangen. Gleiches gilt für den umgekehrten Fall.

Wie bereits in der Ultraschalltechnik (Kapitel 5.2) erwähnt, hängt die Bewertung von den messsystembedingten Limitierungen, der Messwiederholungsgenauigkeit und der Beurteilung äußerer Randeinflüsse ab. Unter Verwendung des in Abbildung 5-26 gezeigten Messaufbaues (exemplarisch für eine longitudinale Resonanzanalyse dargestellt) mit dem Beschleunigungssensor Model 8694M1, dem Impakthammer 8204 sowie dem Datenerfassungssystem LMS SCADAS Mobile (Kapitel 4.4) hat sich bei Voruntersuchungen gezeigt, dass die Impaktanregung mit dem Hammer die größtmögliche Standardabweichung in der Resonanzfrequenz- und Dämpfungsfaktorbestimmung erzeugt. Der Einfluss einer Sensorneueinkopplung ist vergleichsweise gering. Folglich werden für die Fehlerberechnung jeweils drei Einzelmessung je Testkörper und Zustand durchgeführt. Da eine zuverlässige amplitudentreue Impakt-Frequenzanregung laut Hersteller nur bis circa 10 kHz gewährleistet werden kann, beschränkt sich die Datenauswertung auf die Grundschnwingungen der einzelnen Modi, welche eine Auswertung bis maximal 12 kHz (longitudinal) verlangen. Höher angeregte Oberschwingungen werden nicht berücksichtigt.

Die implementierten Einstellungen für die Digitalisierung der analogen Schwingungen sowie der Berechnung der Frequenzantwortfunktion mittels FFT-Analyse befinden sich in Tabelle 0-8 (Appendix B).

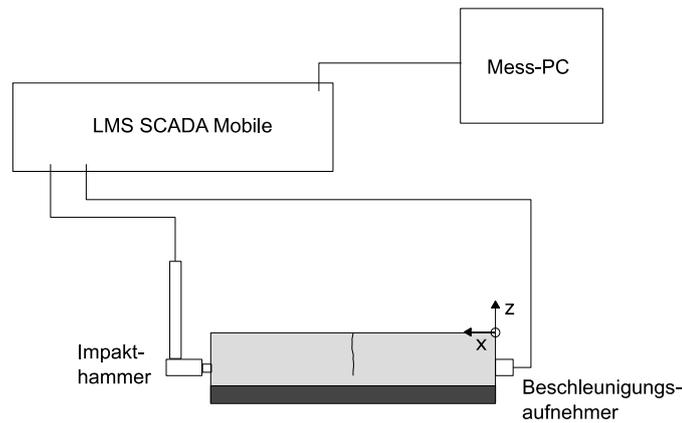


Abbildung 5-26: Messaufbau für Schwingungsanalyse an Mörteltestkörpern. Skizze zeigt Messaufbau für longitudinale Anregung.

### SLV

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Heilungskonzepte auf die betontechnologischen Eigenschaften mit der Schwingungsanalyse zu charakterisieren, dienen die Mörtelprismen, hergestellt nach der Europäischen Norm DIN EN 196-1:2005-05, als Referenztestkörper. Der dynamische E-Modul wurde mittels longitudinaler Resonanzfrequenz zu  $30200 (\pm 400) \text{ N/mm}^2$  und der Schermodul  $G$  zu  $12900 (\pm 600) \text{ N/mm}^2$  bestimmt. Die aus den Moduli berechnete Poissonzahl ergibt 0,17.

Da die Ergebnisse der flexuralen, torsionalen und longitudinalen Schwingungsmoden ein sehr einheitliches Muster zwischen den einzelnen Testkörpern aufzeigen, werden die Auswirkungen der Rissverfüllung anhand der Resultate mit longitudinaler Anregung erläutert (Abbildung 5-27). Bedingt durch die CFK-Armierung steigt die Resonanzfrequenz von  $11,65 (\pm 0,048) \text{ kHz}$  auf  $12,0 (\pm 0,047) \text{ kHz}$  im initialen Zustand an. Die Abweichungen einer mehrfach durchgeführten Messung am ungerissenen Testkörper bewegen sich im einstelligen Hz-Bereich. Mit der Rissinitiierung steigt die Abweichung um eine Potenz. Eine Veränderung der Schwingungsfrequenz für die „Ref“-Testkörper ist innerhalb von vier Tagen nicht vorhanden. Die Risschädigung sowie der kraftschlüssige Rissflankenverbund sind qualitativ zuverlässig detektierbar. Unter Berücksichtigung der ermittelten Rissweiten nach dem initialen 3-P-Biegeversuch, dargestellt in Abbildung 5-6, ist aufgrund der geringen Standardabweichung der Schwingungsanalyse ebenfalls eine quantitative Unterscheidung zwischen den „Testkörpern I-III“ möglich. Dies gilt sogleich für die Heilungseffizienz, bei der ähnlich der Ergebnisse der Centroid Time (Kapitel 5.2.2), „Testkörper III“ aufgrund der partiellen Rissverschließung nur einen minimierten Anstieg der Resonanzfrequenz verzeichnet. Nach der abschließenden zweiten Biegeprüfung („wiederbelastet“) fällt die Frequenz auf die des gerissenen Zustandes zurück. Da keine zusätzliche Schädigung eintritt, kommt es auch zu keiner weiteren Frequenzsenkung.

Der parallel berechnete Dämpfungsfaktor reagiert deutlich sensibler auf eine Materialveränderung. Kommt es zur Schädigung, steigt die Dämpfung. Verglichen mit der Resonanzfrequenz erhöht sich nach der Rissinitiierung jedoch deutlich die Standardabweichung. Auch wenn sich eine Heilung detektieren

lässt, wird dadurch eine zuverlässige Bestimmung der Heilungseffizienz unterbunden (vgl. partielle Heilung bei Testkörper III).

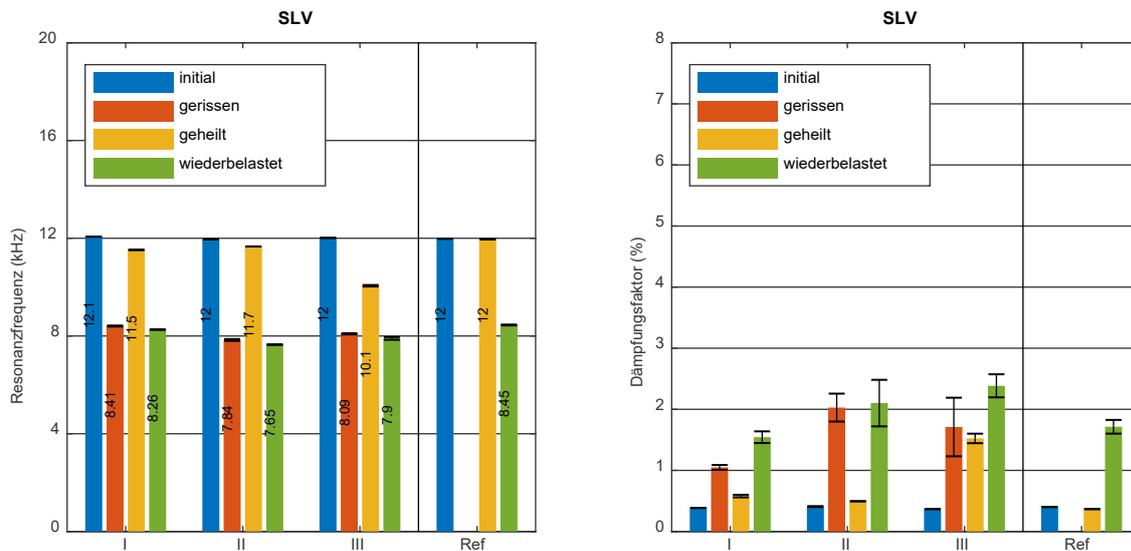


Abbildung 5-27: Resonanzfrequenzen und Dämpfungsfaktor für Mörteltestkörper mit manueller PU-basierter Heilung (SLV) für longitudinale Schwingungsanregung.

## BAC

Der Leichtzuschlag bewirkt im Vergleich zum Normmörtel eine starke Reduzierung des dynamischen E- und G-Moduls (Abbildung 5-28). Ähnlich zu den Ergebnissen aus der maximalen Belastung während des initialen 3-P-Biegeversuchs oder der Centroid Times führt die Imprägnierung mit Bakterien im Vergleich zur Referenzprüfserie zu einem weiteren Abfall der Moduli um circa 30 %. Die Differenz des zusätzlich eingebrachten Wassers von 10 gr. je Prüfserie zeigte hingegen keinen messbaren Effekt.

Der Einfluss der Imprägnierung ist auch noch im initialen Zustand mit CFK-Armierung ersichtlich. Trotz des strukturellen inhomogenen Gefüges durch die Tonkugeln erhöhte sich, im Vergleich zum Normmörtel, die Standardabweichung der einzelnen Zustände beider Prüfserien nur minimal. Auffällig ist, dass die Resonanzfrequenzen im gerissenen Zustand mit den jeweiligen gemessenen Rissweiten (Abbildung 5-11) korrelieren, obwohl alle Testkörper die gleiche Biegebeanspruchung und somit auch die gleiche Schädigung erfahren haben sollten. Somit schien sich aufgrund der inhomogenen Materialstruktur durch den Leichtzuschlag entweder eine ungleichmäßige Risstiefe eingestellt zu haben oder freigesetzte Sand-/Zementpartikel blockierten eine gleichförmige Rückverformung. Entscheidend ist jedoch, dass sich die Differenzen der Resonanzfrequenzen zwischen den einzelnen Zuständen der jeweiligen Testkörper von „Liapor mit BAC“ und „Liapor ohne BAC“ nicht auffällig voneinander abgrenzen. Die ungeschädigten „Ref“-Testkörper verdeutlichen mit einem Anstieg der Frequenz von 7 % (ohne BAC) bzw. 15 % (mit BAC) den signifikanten Einfluss einer Wasserexposition auf die globalen dynamischen Materialeigenschaften und machen eine Charakterisierung der Heilungseffizienz aufgrund einer Biegerisschädigung nicht validierbar.

Während die Schwingungsfrequenzen trotz des mangelnden Nachweises einer autonomen Selbstheilung ein gleichgültiges Gesamtbild mit den einzelnen Stationen des Versuchablaufs abbilden, zeigt der Dämpfungsfaktor für die Analyse nach der 6-wöchigen Nass-Trockenzyklus einen abweichenden Trend. Zwischen dem gerissenen und geheilten Zustand kam es für die Testkörper I-III zu keiner signifikanten Veränderung. Gleiches gilt für die „Ref“-Testkörper zwischen dem initialen und geheilten Zustand. Dieses Verhalten würde zum Ausdruck bringen, dass es zu keiner strukturellen Materialveränderung während der Wasserlagerung kam. Folglich auch nicht zu einer kraftschlüssigen Rissverschließung. Widersprüchlich hingegen ist der überproportionale Anstieg des Dämpfungsfaktors nach der Wiederbelastung, obwohl eigentlich keine weiterführende Schädigung initiiert wurde.

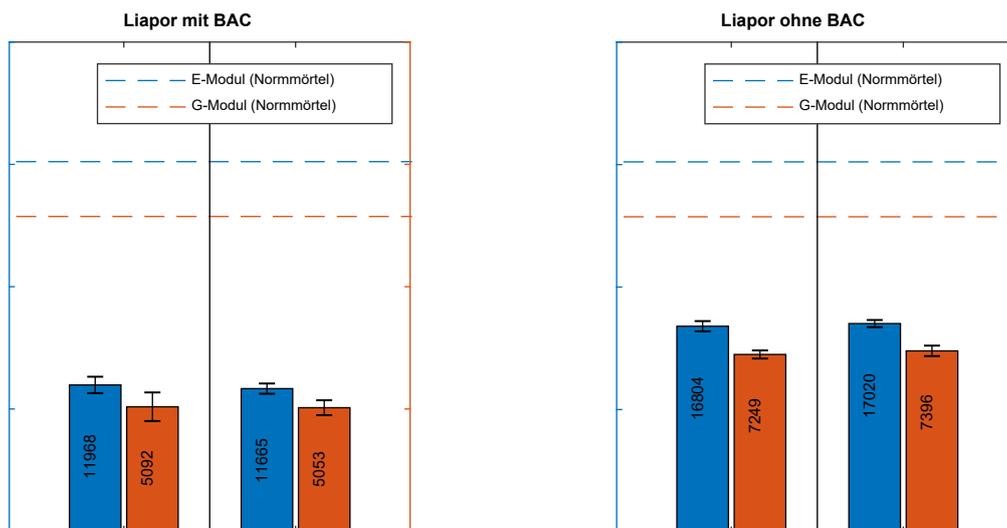


Abbildung 5-28: Dynamischer Elastizitäts- und Schermodul für Mörteltestkörper mit bakterienbasierter Heilung („Liapor mit BAC“) sowie der Referenzprüfserie („Liapor ohne BAC“) aus longitudinaler Schwingungsanregung.

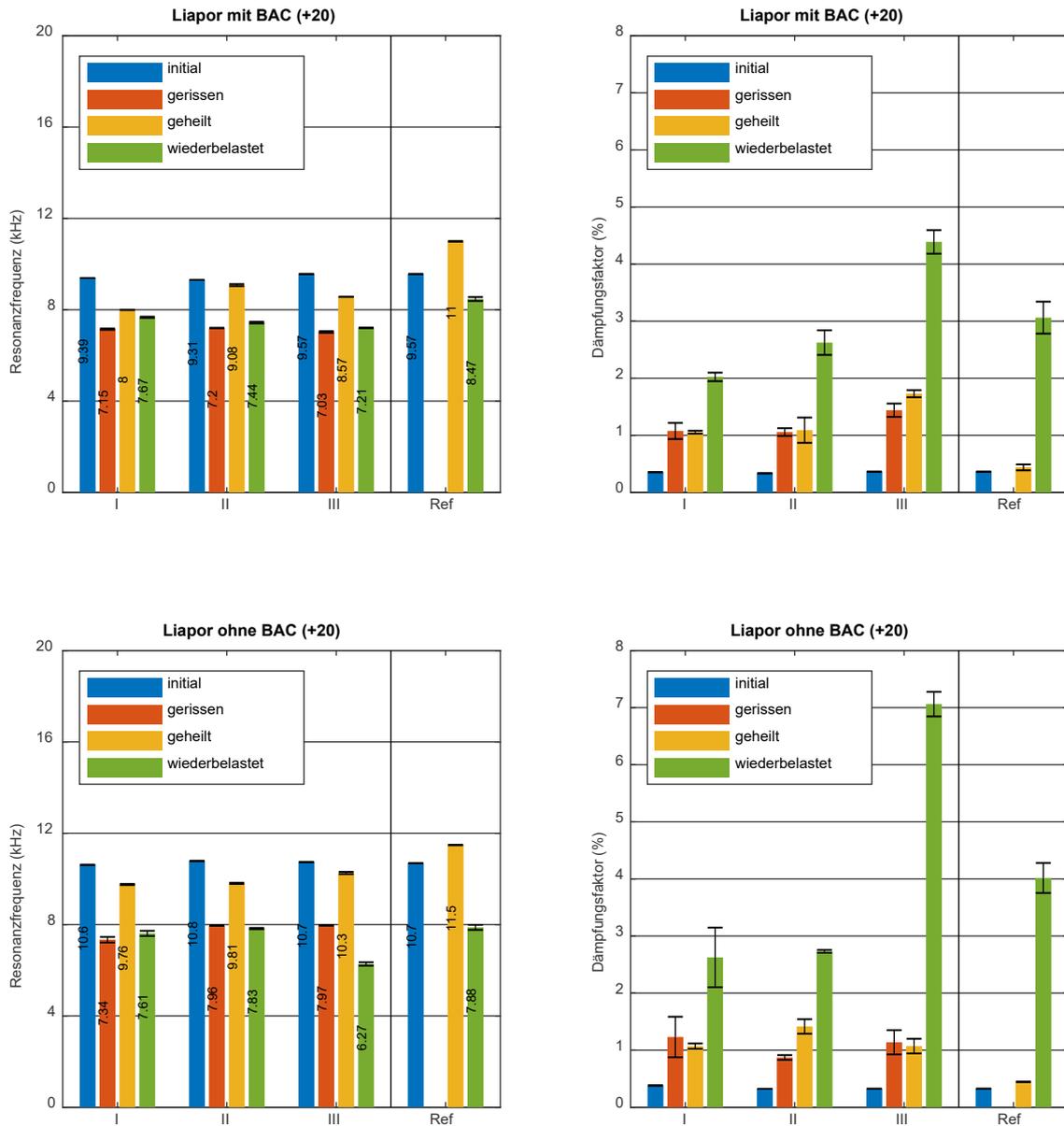


Abbildung 5-29: Resonanzfrequenzen und Dämpfungsfaktor für Mörteltestkörper mit bakterienbasierter Heilung („Liapor mit BAC“) sowie der Referenzprüfserie („Liapor ohne BAC“) für longitudinale Schwingungsanregung.

**SAP**

Der dynamische E-Modul der Mörteltestkörper mit SAPs wird, ähnlich zur Materialdichte bzw. Druckfestigkeit, sehr stark von der Dosierung des Hydrogelgranulats beeinflusst (Abbildung 5-30). Im Vergleich zum Normmörtel führt ein SAP-Gehalt von 2,25 gr. mit einer zusätzlichen Wasserzugabe von 40 bis 60 gr. zu einer Minderung um durchschnittlich 8 (±1) %, während sich der E- bzw. G-Modul für eine Granulatmenge von 4,5 gr. um 28 (±3) % bzw. 26 (±1) % reduziert. Generell zeigt sich ein abfallender Trend mit Steigerung des Extra-Wassers.

Die Ergebnisse zur Charakterisierung der Heilungseffizienz in Abbildung 5-31 zeigen aufgrund des Nass- Trockenzyklus ein ähnliches Muster wie zur Prüfserie mit einer bakterienbasierten Heilung. Die homogene und gleichmäßige Verteilung des Hydrogelgranulats führt innerhalb einer Prüfserie im initialen Zustand zu sehr konstanten Resonanzfrequenzen. Auch hier ist trotz der Armierung eine Differenzierung der Resonanzfrequenzen, bedingt durch die Dosierung des SAP- und Wassergehalts, erkennbar. Im Gegensatz zur Prüfserie mit Liapor-Tonkugeln stimmt das Verhältnis der Rissweiten mit der Abnahme der Resonanzfrequenzen nicht kontinuierlich überein. Dennoch weist z. B. Testkörper II (SAP 2,25 gr. (+ 40)) mit der dominierenden Rissweite auch eine verhältnismäßig größere Frequenzabnahme auf. Die 6-wöchige Heilungsphase lässt die Schwingungsfrequenz zwar wieder stark ansteigen, allerdings bewirkt eine Verdoppelung der Granulatmenge keine höhere Effizienz in Form einer Frequenzsteigerung.

Die jeweils parallel berechneten Dämpfungsfaktoren bleiben auch in diesem Fall, entgegen dem Trend der Resonanzfrequenz, nach dem Nass- Trockenzyklus weitestgehend unverändert.

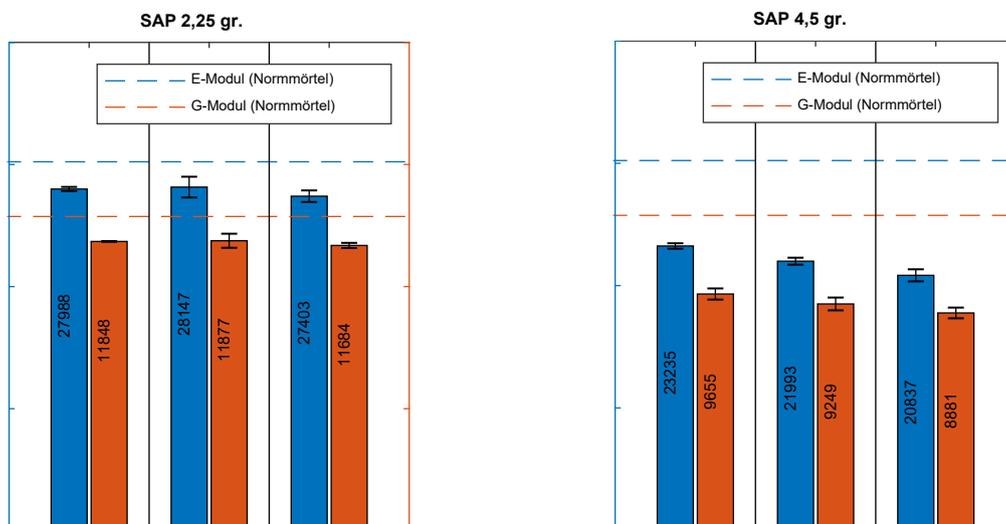


Abbildung 5-30: Dynamischer Elastizitäts- und Schermodul für Mörteltestkörper mit einer autogen verstärkten hydrogelbasierten Heilung („SAP 2,25 gr.“, „SAP 4,5 gr.“) aus longitudinaler Schwingungsanregung.

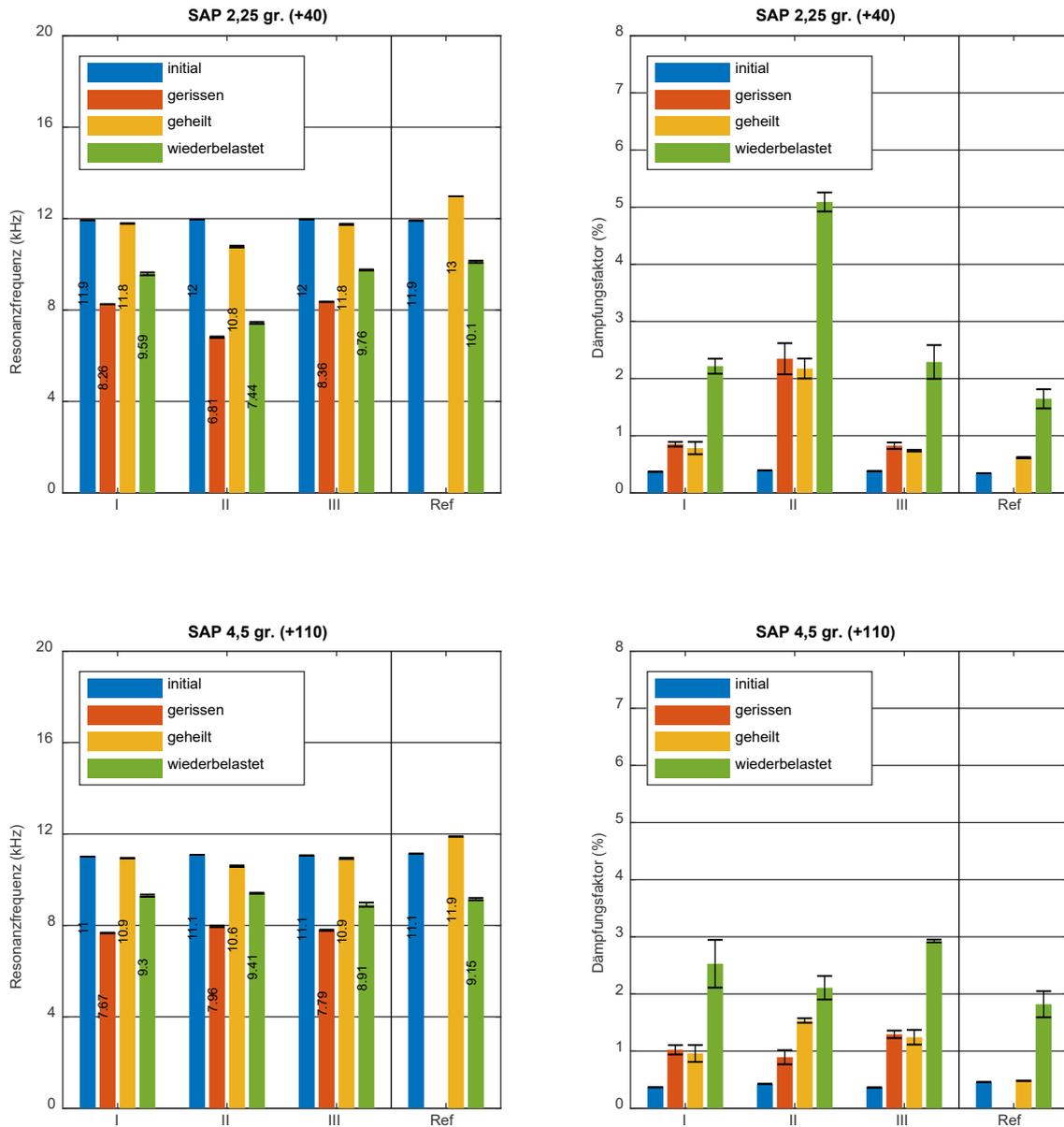


Abbildung 5-31: Resonanzfrequenzen und Dämpfungsfaktor für Mörteltestkörper mit einer autogen verstärkten hydrogelbasierten Heilung („SAP 2,25 gr.“, „SAP 4,5 gr.“) für longitudinale Schwingungsanregung.

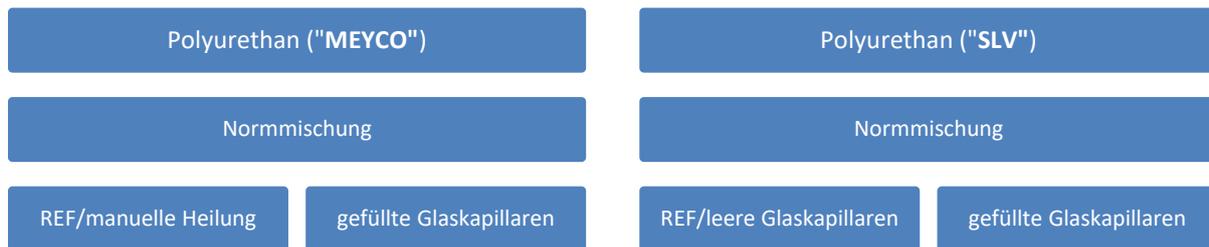
## 6 Meso-Ebene: Betontestkörper

Die Verwendung von Mörtelprismen stellt nur einen Zwischenschritt in der Entwicklungsphase von neuartigen zementgebundenen Werkstoffen, welche in der Zukunft in realen Betonstrukturen eingesetzt werden sollen, dar. Der Zusatz von grober Gesteinskörnung, die veränderte Sieblinie sowie das Hinzufügen von notwendigen Additiven wirken sich intensiv auf die betontechnologischen Eigenschaften innerhalb der Herstellungsphase bis hin zur Aushärtung und langfristigen Nachverfestigung aus. Diese neuartige Materialkomposition kann sich ebenfalls in einer abgeänderten Form auf die gewünschten Selbstheilungseigenschaften auswirken und erfordert somit eine eigene Konzeption und Untersuchungsstudie. Dieses sogenannte Upscaling von der Meso- zur Makro-Ebene beeinflusst neben materialwissenschaftlichen und werkstofftechnischen Eigenschaften auch die Evaluierung mit zerstörenden und zerstörungsfreien Prüftechniken. So bietet beispielsweise die vergrößerte Bauteiloberfläche die Möglichkeit zu Anwendungen mit der Schallemissionsanalyse, welche eine geeignete Methode hinsichtlich der Triggerung von Kapselbrüchen ist und unter bestimmten Voraussetzungen eine Beurteilung eines kraftschlüssigen Rissflankenverbundes ermöglicht. Ebenso hat z. B. die Anwendung des ToFD-Verfahrens innerhalb der Mörtelprüfserien aufgrund der geringen Abmessungen keine vielversprechenden Resultate gezeigt. Mit der Untersuchung von aufskalierten Schädigungen an größeren Testobjekten sind nun auch größere Messdifferenzen zu erwarten, welche die Messfehler überwiegen.

Um den Einsatz von zerstörungsfreien Prüftechniken langfristig als Messinstrument im Bauwesen zu etablieren, muss eine nachgewiesene zuverlässige und auch qualitative Validierung möglich sein. Die durchgeführten Versuchsreihen mit Betonbalken dienen daher als erster Schritt, die Prüftechniken auf möglichst reale Rand- und Umgebungsbedingungen abzustimmen, damit diese auch weiterführend in den nächsten Studien etabliert werden können.

Da die Anforderungen an die Heilmittel sehr stark von der globalen und auch lokalen Beanspruchung des Bauteils bzw. Bauwerks abhängen, müssen sämtliche potentiell in Frage kommenden Heilungskonzepte einzeln und in Zukunft auch kombiniert untersucht werden. Für eine kraftschlüssige Rissverschließung wurden in diesem Kapitel zunächst zwei verschiedene Polyurethane „HA Flex SLV“ und „MEYCO MP 355 1K“ (Kapitel 2.4) separiert auf deren Heilungseigenschaften überprüft. Eine tabellarische Übersicht über das Versuchskonzept ist in Tabelle 6-1 gegeben. Normmischung bezeichnet dabei einen Normalbeton nach DIN-1045-2 mit einer Sieblinie A16 und einem Wasserzementwert (w/z-Wert) von 0,5 (vgl. Tabelle 6-2).

Tabelle 6-1: Versuchskonzept mit Betontestkörpern mit zwei unterschiedlichen Polyurethanen (HA Flex SLV, MEYCO MP 355 1K) für eine autonome Selbstheilung.



Als Verkapselungstechnik dienten Glaskapillaren, welche in der prognostizierten Risszone (Kerbe, vgl. Abbildung 6-2/Abbildung 6-3) während der Betonage mit eingebracht wurden. Voruntersuchungen zeigten, dass der Herstellungsprozess, besonders während der Betonverdichtung, zu keiner vorzeitigen Schädigung der Kapillaren führte. Als Bewehrung sind für alle nach DIN EN 206-01 hergestellten Testkörper zwei profilierte Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 6 mm im oberen Prüfkörperbereich eingesetzt worden (Abbildung 6-2/Abbildung 6-16). Eine Verwendung von ursprünglich angesetzten 8 mm-Einzelstäben, die außerhalb der Forschung als Mindestmaß gelten, hätte eine zu hohe Lastaufnahme seitens der Prüfmaschine gefordert. Die spezifische Positionierung hatte den Vorteil, dass während der Rissinitiierung die Bewehrung in der Druckzone lag und der Riss ohne erhebliche Zugkräfte über die an der Unterseite angebrachten induktiven LVDT<sup>24</sup>-Wegaufnehmer (D6/01000A, RDP Group) während des 3-P-Biegeversuchs kontrolliert werden konnte. Mit Zunahme der Rissweite wanderte die Zugzone nach oben und die Bewehrung wird elastisch-plastisch gedehnt. Bei Entlastung bleibt der plastische Anteil erhalten, welcher den Riss mit der gewünschten Öffnungsweite statisch offenhält. Weiterer positiver Nebeneffekt durch die Einbringung im oberen Testkörperquerschnitt ist, dass für die zerstörungsfreien Messverfahren keine akustischen Brücken zwischen den Rissflanken entstehen, welche die Untersuchungen erheblich hätten beeinflussen können. Eine über den Querschnitt verlaufende 5 mm tiefe Kerbe leitete dabei eine standardisierte und ortsgezielte Rissinitiierung ein, sodass ein Aufbrechen der Glaskapillaren während der Biegebelastung gewährleistet werden konnte. Die anschließende Rissverfüllung durch die unterschiedlich viskosen Polyurethane wurde maßgeblich durch die kapillaren Saugkräfte, also durch ein komplexes Zusammenspiel aus Rissformation bzw. -profil, Aushärtegeschwindigkeit des Heilmittels sowie dessen chemische Wechselwirkung mit der Zementmatrix innerhalb der Risszone beeinflusst [Gardner et al. 2014].

<sup>24</sup> Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

Tabelle 6-2: Betonrezept für Testkörper „MEYCO“ und „SLV“. Herstellung erfolgt nach DIN EN 206-01.

	d/D	Anteil (kg/m <sup>3</sup> )
<b>CEM I 42.5 N</b>		300
<b>Sand</b>	0/2 („MEYCO“), 0/4 („SLV“)	686
<b>Kies</b>	4/8	502
<b>Kies</b>	8/16	809
<b>Wasser</b>		150
<b>Gesamt</b>		<b>2447</b>

Der generelle Ablauf beider Versuchsreihen („MEYCO“/„SLV“) ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Da sich die einzelnen Versuchs- und Messaufbauten sowie die entsprechend angepassten Messeinstellungen teilweise unterschieden, wurden die individuell und getrennt voneinander durchgeführten Untersuchungen in eigenen Kapiteln dokumentiert.

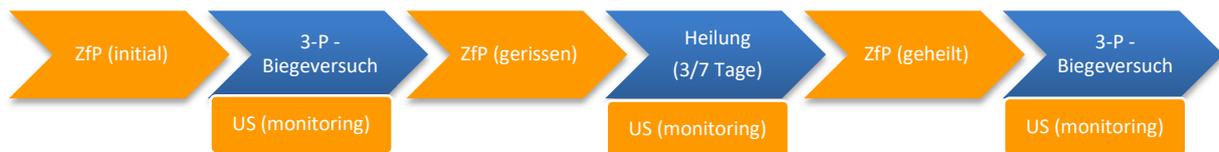


Abbildung 6-1: Flussdiagramm zur Darstellung des Versuchablaufs einer Evaluierung der Heilungseffizienz von Mörtelprismen mit kraftschlüssigen Selbstheilungseigenschaften.

## 6.1 Betontestkörper mit MEYCO

Über bereits durchgeführte Studien mit dem Polyurethan „MEYCO“ als rissverfüllendes Heilmittel konnten zahlreiche Informationen über die physikalischen, chemischen und auch versuchsabhängigen Auswirkungen bei zementgebundenen Werkstoffen gesammelt werden [Gilabert et al. 2017, Gruyaert et al. 2016a, Hilloulin et al. 2015, Hu et al. 2018, Maes et al. 2014, Minnebo et al. 2017, Van Stappen et al. 2016, Wang et al. 2014]. So hat sich z. B. gezeigt, dass Glaskapillaren als Trägergefäß der Heilmittel einerseits widerstandsfähig gegen den Betonverdichtungsprozess unter kontrollierten Laborbedingungen sind und zugleich eine erfolgreiche Aktivierung der Selbstheilung durch Risschädigungen begünstigen. Die Anwendung von zerstörungsfreien Prüfverfahren, wie z. B. Ultraschall oder die Schallemissionsanalyse, konnte zudem bereits erste Ansätze zur Evaluierung von Selbstheilungseffekten nachweisen. Eine quantitative Beurteilung konnte jedoch nicht erzielt werden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sollten nun Betontestkörper mit einer unterschiedlichen Anzahl an einbetonierten gefüllten Kapillaren (Tabelle 6-3) detaillierte Informationen über die Aktivierung, der rissverfüllenden Ausbreitung sowie des kraftschlüssigen Rissverbundes liefern.

Tabelle 6-3: Übersicht der individuellen Betontestkörper mit polyurethanbasierter Heilung („MEYCO“).

Polyurethan (MEYCO)			
MEYCO I	MEYCO II	MEYCO III	MEYCO IV
1 Kapillarenpaar (mittig)	2 Kapillarenpaare	2 Kapillarenpaare	manuelle Heilung

### 6.1.1 Versuchsdurchführung

Um eine möglichst reproduzierbare Versuchsdurchführung zu erhalten, wurden Betontestkörper mit den Abmessungen 550x150x150 mm nach DIN EN 206-01 (Tabelle 6-2) in zwei Chargen (80/60 Liter) hergestellt. Die Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen betrug 51,0 ( $\pm 2,5$ ) MPa.

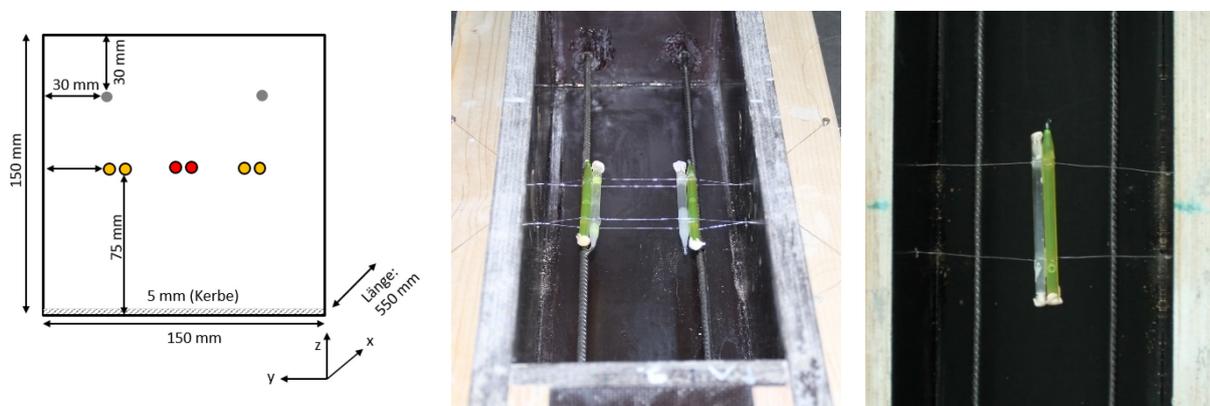


Abbildung 6-2: Links: Schematischer Aufbau der bewehrten (grau) Betonbalkenserie „MEYCO“. Die Anordnung mit „gelben“ Glaskapillaren umfasst zwei Röhrenpaare („MEYCO II/III“, wobei „rot“ nur ein mittig positioniertes Paar („MEYCO I“) aus Polyurethan und Beschleuniger darstellt. Mitte und rechts: Schalungsaufbau mit Bewehrungsstäben und ein bzw. zwei mittig fixierte Glaskapillarnpaare, jeweils gefüllt mit dem Polyurethan „MEYCO“ und Beschleuniger. Die 5 mm tiefe Kerbe befindet sich in Testkörpermitte (Länge: 275 mm).

Da für die Reaktion des verwendeten Heilmittels „MEYCO“ ein Beschleuniger notwendig ist, bestand eine Einheit immer aus einer 100 mm langen Glaskapillare (Innendurchmesser 4 mm, Wandstärke 1 mm) gefüllt mit „MEYCO“ und eine Kapillare gefüllt mit Beschleuniger und Wasser, dem Prepolymer. Zusätzlich wurden dem Polyurethan fluoreszierende Pigmente hinzugegeben, um die Sichtbarkeit der Heilmittelverteilung zu verbessern. Die Versiegelung der Röhren erfolgte mit HBM X60 (Methyl-Methacrylat). Als Referenztestkörper mit anschließender manueller Rissverfüllung diente ein Testkörper ohne eingebrachte Kapillaren („MEYCO IV“). Dafür wurden nach der initialen Rissinitiierung die Balkenaußenseiten mit Klebeband abgedichtet und die Kerbenöffnung anschließend mittels Spritze mit Polyurethan sowie im direkten Anschluss mit dem Prepolymer verfüllt. Da keine Verpressung stattfand, war die Heilmittleindringung durch kapillares Saugen sowie auf die Schwerkraft beschränkt. Für die autonome Selbstheilung wurden zwei unterschiedliche Anordnungen der Kapillaren in der Betonmatrix verfolgt. Der konzeptionelle Aufbau der Betontestkörper ist in

Abbildung 6-2 zeigt. Aufgrund der eigens konzipierten Holzschalung konnte ein von außen verspannter Metalldraht durch die Schalungswände die Kapillaren während der Betonage in Position halten. Die Ausschalung erfolgte nach 24 Stunden mit einer anschließenden 28-tägigen Lagerung in einer Klimakammer (20 °C, >95 % rel. LF).

Nach Abschluss der initialen zerstörungsfreien Prüfungen (US und Schwingungsanalyse) erfolgte die rissweitenkontrollierte Schädigung via 3-P-Biegeversuch mit einer Geschwindigkeit von 0,06 mm/min (LVDT) bis zu einer maximalen Rissöffnung von 1 mm (Abbildung 6-3). Nach Entlastung stellte sich eine Rissweite von 400-500 µm ein (Abbildung 6-4). Während der gefolgten Aushärtezeit von sieben Tagen in einer Klimakammer (20 °C, 65 % rel. LF) lagerten die Testkörper mit eingebrachten Glaskapillaren mit der Rissöffnung nach unten. Der Testkörper mit manueller Verfüllung zeigte mit der Kerbe nach oben, um ein verstärktes Eindringen in den Riss zu erzielen. Da ein vollständiges Auseinanderbrechen mit diesem Testkörperkonzept nicht zu erwarten war, erfolgte die Wiederbelastung nach der Selbstheilung/Aushärtung erneut bis 1 mm. Diese Einstellung ist jedoch besonders bei der Auswertung und Interpretation der nachfolgenden Ultraschall- und Schallemissionsergebnisse zu beachten, da die anfängliche Rissweite überschritten wird.

Abbildung 6-5 zeigt die Anfangs- und Wiederbelastungskurven der Betontestkörper „MEYCO I-IV“. Der sehr konstant verlaufende initiale Kraft-Rissweitenverlauf lieferte Maximalbelastungen zwischen 28,3 kN-34,3 kN. Eine Ausnahme stellte Testkörper „MEYCO III“ dar, bei dem es zu einer fehlerhaften Versuchsdurchführung kam. Dies hatte allerdings zu keiner beeinträchtigenden Schädigung geführt, sodass der Testkörper für alle weiterführenden Messungen und Untersuchungen mit einbezogen werden konnte. Allerdings wurde die maximal zu erreichende Rissweite laut Datenaufzeichnung (Abbildung 6-5) nicht erreicht, sodass dieser Umstand ebenfalls bei der Ergebnisinterpretation mitberücksichtigt werden muss.

Die wiedererlangten Maximalbelastungswerte für die Testkörper II-IV, welche sich durch einen Peak im Kraft-Rissöffnungsverlauf abzeichnen, schwanken zwischen 6,4 kN-9,7 kN, wobei Balken „MEYCO I“ aufgrund des Kurvenverlaufs keinen eindeutigen kraftschlüssigen Verbund aufzeigt. Das Verhältnis der Spitzenlast aus der initialen Beanspruchung zur Wiederbelastung gibt dabei die kraftbezogene Heilungseffizienz wieder (Tabelle 6-4).

Tabelle 6-4: kraftbasierte Heilungseffizienz und benetzte Fläche mit Polyurethan der MEYCO-Testserie.

	MEYCO I	MEYCO II	MEYCO III	MEYCO IV
<b>Kraftbasierte Heilungseffizienz (%)</b>	-	28	24	22
<b>Benetzte Fläche mit PU (%)</b>	-	47	21	17

Um eine quantitative Analyse der Heilmittelverteilung innerhalb der Risszone nach 7-tägiger Lagerung zu erhalten, wurden die Betonbalken nach Abschluss aller Prüfverfahren mittels Biegebelastung in der Bruchzone auseinandergetrennt. Dabei fiel auf, dass das Polyurethan bei „MEYCO I“ und bei „MEYCO III“ (linkes Paar) nur minimal im direkten Kapillarenbereich einen ausgehärteten Verbund bildete und sich erst nachträglich, mit der vollständigen Durchtrennung der Balken, entleerte. Dass in Abbildung 6-9 sichtbare Ergebnis ist für die genannten Testkörper somit durch das nachträgliche Auslaufen des

Polyurethans aus den Kapillaren verfälscht. Unter Berücksichtigung dieser Umstände ergab sich, dass die unterschiedlichen Mengen an freigesetztem Polyurethan innerhalb der Prüferie (Abbildung 6-6) mit der Heilungseffizienz einhergehen. Testkörper „MEYCO II“, welcher eine Benetzungsfläche von 47 % („MEYCO III“: 21 %, „MEYCO IV“: 17 %) aufzeigt, weist dabei die höchste kraftbasierte Heilungseffizienz auf.

Da die Betonbalken im Anschluss an den 3-P-Biegeversuch für die Ultraschallprüfung mit der Rissöffnung kurzzeitig nach oben gedreht wurden, ist eine Analyse aufgrund des reinen kapillaren Saugeffektes nicht möglich. Identisch zu den Ergebnissen von Van Tittelboom et al. (2018), in denen das gleiche Heilmittel zum Einsatz kam, konnte aufgrund der manuellen Injektion bei Testkörper „MEYCO IV“ nur eine geringe Eindringtiefe von maximal 4 cm von Kerbenoberkante erzielt werden. In diesem Falle ist das PU-Gefüge jedoch sehr komprimiert.

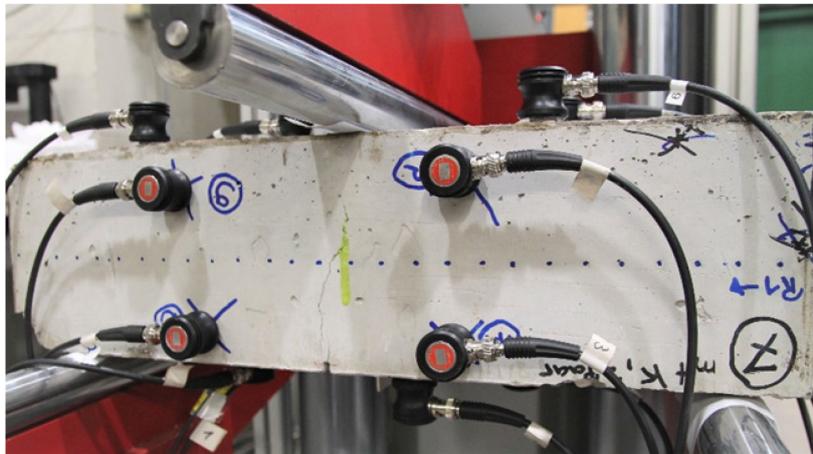


Abbildung 6-3: Initialer 3-P-Biegeversuch eines Betontestkörpers mit angebrachten Schallemissionssensoren (Olympus Panametrics V103-RB). Die rissweitengesteuerte Belastung wird mittels LVDT-Wegmessung kontrolliert.

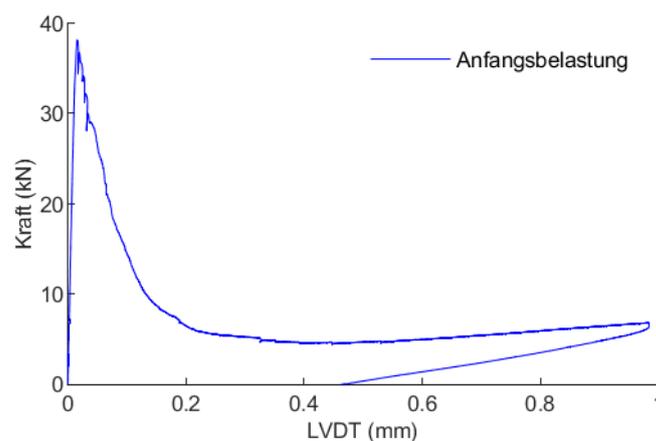


Abbildung 6-4: Exemplarisches Kraft-Rissöffnungsverhalten während des initialen 3-Punkt-Biegeversuchs von Testkörper „MEYCO IV“. Das rissweitengesteuerte Belastungsszenario erfolgte bis 1 mm, was zu einem plastischen Verformungsverhalten führt. Die Wiederbelastung nach der Selbstheilung/Aushärtung erfolgte ebenfalls bis 1 mm, sodass die maximale Rissweite aus der initialen Belastung um diesen Wert überschritten wird.

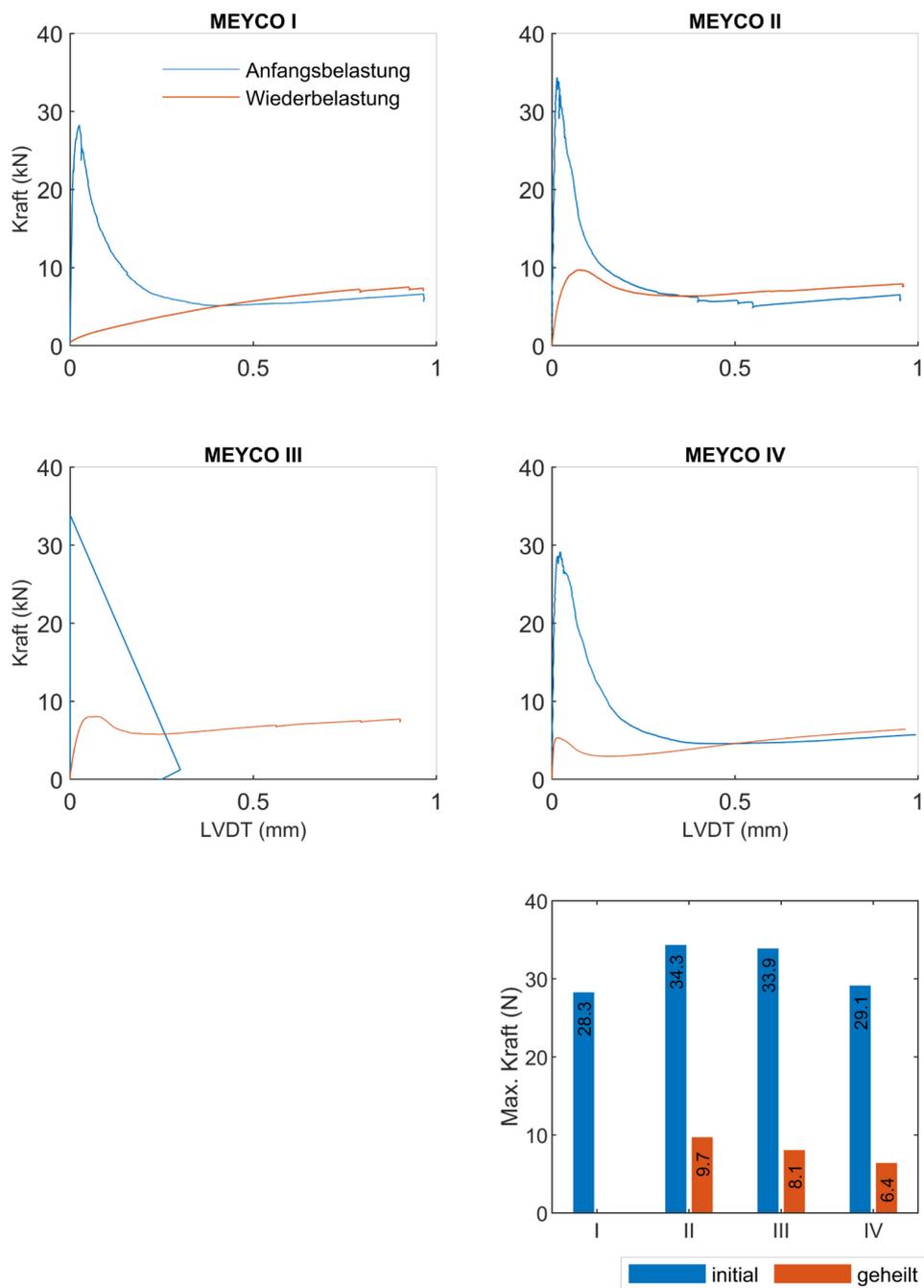


Abbildung 6-5: Kraft-Rissöffnungsverhalten für MEYCO-Testkörper während des initialen 3-Punkt-Biegeversuchs (=Anfangsbelastung) und sieben Tage nach der Selbstheilung /Aushärtung (=Wiederbelastung). Die einzelnen Spitzenlasten sind zudem im Balkendiagramm dargestellt. Aufgrund fehlerhafter Einstellungen der Anfangsbelastung für „MEYCO III“ ist der Versuch nach Erreichen der Spitzenlast abgebrochen worden.

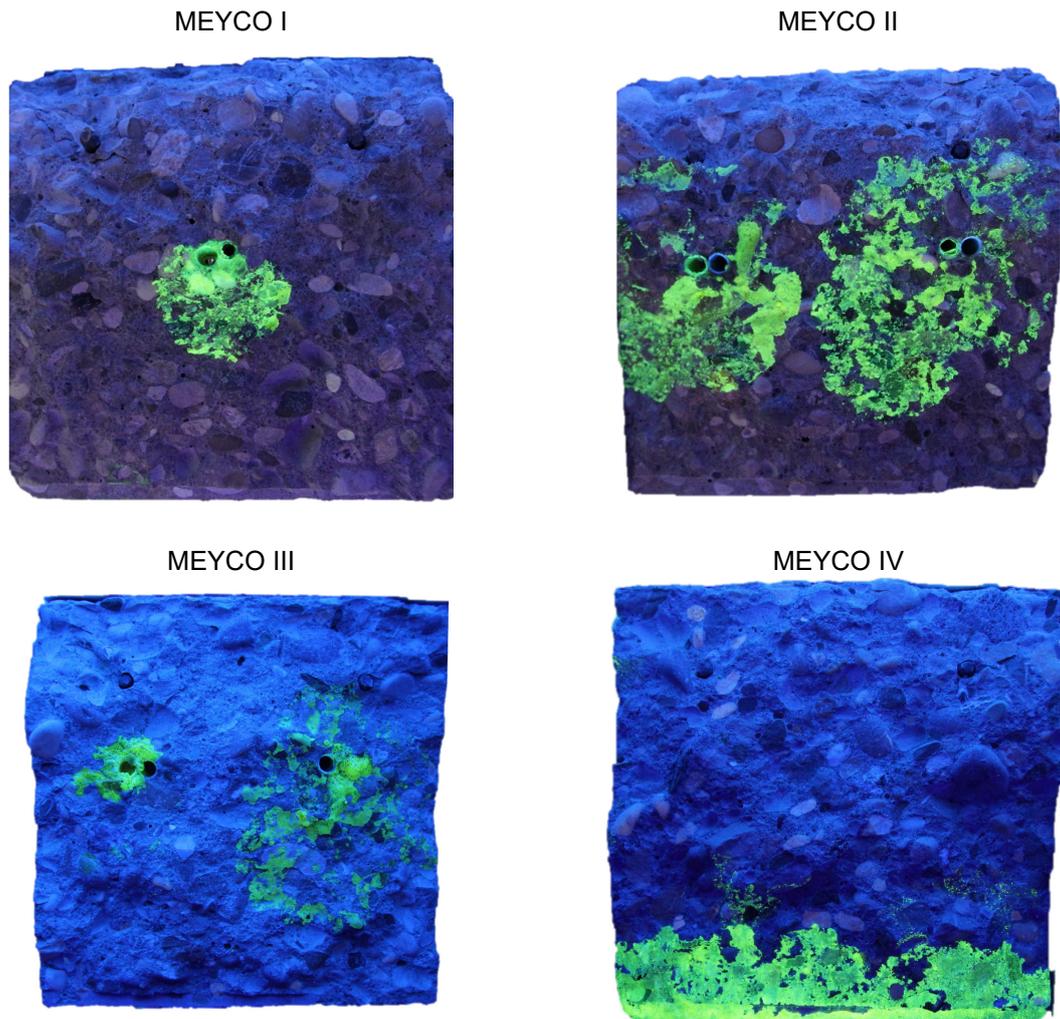


Abbildung 6-6: Querschnittsflächen der Risszone der Betontestbalken mit freigesetztem Heilmittel „MEYCO“. Um die Sichtbarkeit der Polyurethan-basierten Heilmittelverteilung zu verbessern, wurden fluoreszierende Pigmente hinzugefügt.

### 6.1.2 Ultraschall: ToFD

Basierend auf dem Versuchsablauf in Abbildung 6-1 erfolgten zu den jeweiligen Zuständen „initial“, „gerissen“ und „geheilt“ Ultraschall-Transmissionsmessungen zur Bestimmung der Risstiefe nach dem ToFD-Verfahren (Kapitel 4.1.2). Anhand der Kalibriermessungen (Abbildung 4-2) wurde ein vom Riss ausgehender symmetrischer Geber-Empfänger-Sensorabstand von 150 mm gewählt. Da während des 3-P-Biegeversuches bereits ein zügiges Freisetzen des Polyurethans ersichtlich war und die Ultraschallmessungen möglichst unverfälscht jeden einzelnen Zustand charakterisieren sollten, wurde ein Versuchsaufbau mit einer manuellen Sensorankopplung gewählt. Zudem ermöglichte die punktförmige Sensorankopplung der UP-DW-Sensoren mit Ultraschallgel ein präzises und gleichförmiges Messraster von insgesamt sieben Messpunkten (Abbildung 6-8). Weiterführend erfolgte die Datenauswertung mit einem tomographischen Ansatz, wodurch sich 13 Detektionspunkte ergaben. Das schematische Messprinzip ist in Abbildung 4-4 gegeben. Abbildung 6-7 zeigt den experimentellen US-Versuchsaufbau, wobei in Tabelle 0-9 (Appendix C) die dazugehörigen System- und

Messeinstellungen zu finden sind. Um eine bestmögliche Ersteinsatzbestimmung zu garantieren, erfolgte die Datenauswertung manuell.

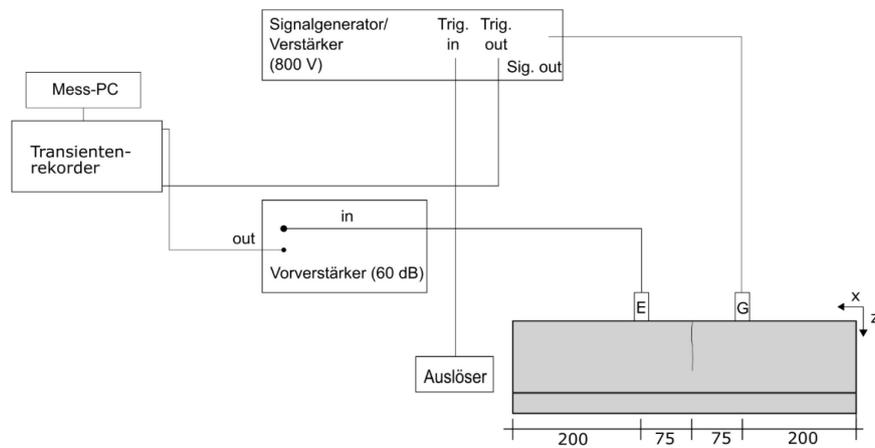


Abbildung 6-7: Experimenteller Versuchsaufbau für ToFD-Messungen an MEYCO-Betontestkörpern.

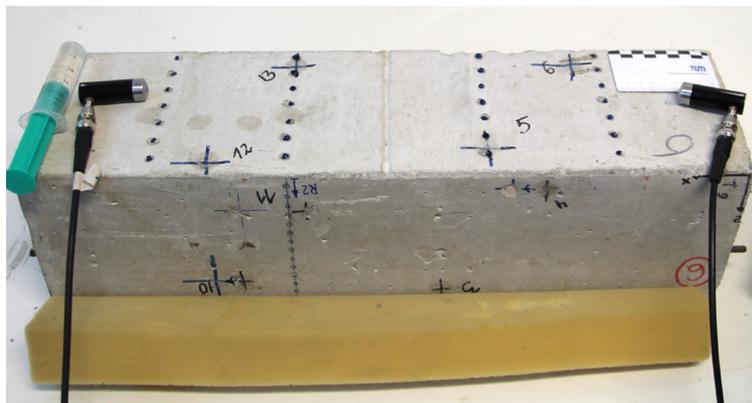


Abbildung 6-8: Versuchsaufbau für ToFD-Messung an MEYCO-Testkörpern mit manueller Sensorankopplung (UP-DW, Geotron Elektronik).

In Abbildung 6-9 sind die aus den Laufzeitdifferenzen berechneten Risstiefen zu den Zuständen „gerissen“ und „geheilt“ aufgetragen. Die parallele Hintergrunddarstellung eines Realbildes des vollständigen Querschnitts über die Rissfläche lässt die Ergebnisse im Nachhinein zuverlässig validieren. Da sich für jede Empfänger-Geberkombination aufgrund des auf mikrostruktureller Ebene betrachteten Materialgefüges eine gewisse Schwankung in der Schallausbreitungsgeschwindigkeit ergab, diente jede individuelle Laufzeitmessung im initialen Zustand als Ausgangswert für die darauffolgenden Zustände. Voraussetzung für diese Art der Datenanalyse ist eine reproduzierbare und zuverlässige Ersteinsatzbestimmung, welche maßgeblich durch das S/N-Verhältnis beeinflusst wurde. Nach der Rissinitiation stellten sich für die Testkörper „MEYCO I-III“ unterschiedliche Risstiefen ein, wobei diese über ihren jeweiligen Querschnitt sehr gleichmäßig verliefen<sup>25</sup>. Der Fehlerbalken je Detektionspunkt resultiert aus der Redundanz, welche im Mittelpunkt am größten ist. Unter

<sup>25</sup> Die Datenerhebung für Testkörper „MEYCO IV“ war für den gerissenen Zustand fehlerhaft.

Berücksichtigung der individuellen Polyurethanverteilung, welche eine Durchdringung bis teilweise auf Bewehrungshöhe offenbart, lässt sich schlussfolgern, dass die ermittelte Risstiefe mittels ToFD-Verfahren sowie des dazugehörigen Versuchsaufbaus minimal (mm-Bereich) unterschätzt wurde. Wie bereits in Kapitel 4.1.2 erläutert, sind dafür akustische Brücken, resultierend aus dem Bruchprozess, sowie verstärkte Dämpfungseffekte aufgrund einer Schalllaufwegverlängerung des Prüfsignals mit verantwortlich. In diesem Fall kommt hinzu, dass die Betonbalken nach der Biegebeanspruchung für die Ultraschallmessung mit der Rissoberkante nach oben gedreht wurden, sodass eine gewisse Zeitspanne von mehreren Minuten vorhanden war, in der sich das PU in Richtung Riss Spitze ausbreiten konnte.

Nach Abschluss des 7-tägigen Heilungs- und Aushärtungsprozesses verringerte sich die Risstiefe infolge eines Rissflankenverbundes. Dieses Verhalten ist besonders bei Testkörper „MEYCO III“ sichtbar, da nur ein Kapillarenpaar zu einer großflächigen und einseitigen Verfüllung führte. Dementsprechend passte sich die detektierte Risstiefe an. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass aufgrund der konzentrischen Wellenausbreitung der Ersteinsatz idealerweise den kürzesten Laufweg zwischen Geber und Empfänger widerspiegelt. Dass sich theoretisch keine sprunghafte und folglich auch keine klare Abgrenzung zwischen einer partiellen Heilung und einer unverfüllten Rissstelle mit dem ToFD-Verfahren ermitteln lässt, verdeutlicht auch „MEYCO II“ in Balkenmitte. Die erst nachträgliche Verfüllung von „MEYCO I“ (vgl. Kapitel 6.1.1) korreliert mit dem Resultat aus dem ToFD-Verfahren. Des Weiteren ist auffällig, dass bei „MEYCO II“ und „MEYCO IV“ die Standardabweichung im geheilten Zustand im Vergleich zu „MEYCO III“ deutlich geringer ist. Grund für die Unregelmäßigkeiten bei „MEYCO III“ könnte die auffällig dünne Verbundmatrix zwischen den Rissflanken sein. Im Gegensatz dazu weisen „MEYCO II und IV“ eine kompaktere und dickere Film- bzw. Schaumstärke des Polyurethans an der Betonmatrix auf, welche bei „MEYCO IV“ aufgrund der manuellen Verfüllung am stärksten ausgeprägt ist. Diese klar abgrenzte Verbundeigenschaft könnte zu der sehr konsistenten Risstiefenermittlung mit tomografischen Ansatz geführt haben. Zugleich ergab sich, trotz eines vollständigen Verbundes an der Rissoberkante („MEYCO IV“), eine Laufzeitdifferenz von circa 30 Samples zwischen initialen und geheiltem Zustand. Diesen Differenzunterschied erklärt möglicherweise die Detektion einer veränderten Signalphase als Ersteinsatz, welche auf einer akustischen Impedanzänderung (Beton → PU → Beton) beruht. Obwohl diese Differenz angesichts der Abtastrate relativ gering ist, wirkt sich dieser Effekt bei Werten nahe der initialen Laufzeit wesentlich prägnanter aus (vgl. Abbildung 4-2/Gl. 4-5).

Als Schlussfolgerung dieser Untersuchung kann gesagt werden, dass eine quantitative Beschreibung der Rissverfüllung mit dem verwendeten Polyurethan „MEYCO“ grundsätzlich möglich ist. Da jedoch immer nur die oberflächennahe Verbundgrenze detektiert wird, an der auch die einseitige Sensorankopplung für die indirekte Transmissionsmessung erfolgt, lässt das ToFD-Verfahren keine Aussage über den Grad der Verfüllung zu. Theoretisch könnte dies über eine Betrachtung des Amplituden- und Dämpfungsverhaltens des Ultraschallsignales erfolgen, fordert jedoch eine präzise Kenntnis über die veränderte Schallwellenausbreitung aufgrund des neuartigen Materialverbundverhaltens. Zugleich muss eine exakt reproduzierbare Versuchsdurchführung sowie eine konsistente Datenerhebung gewährleistet sein. Amplitudenstarke Oberflächenwellenmessungen [Aggelis et al. 2007, Lee et al. 2016], kombiniert mit einer kontaktfreien Sensorankopplung [Fey et al.

2012], wären potentielle Instrumente für eine praxisnahe Realisierung. Ist ein Zugang der beiden gegenüberliegenden Bauteiloberflächen möglich, bietet der tomographische Lösungsansatz von Shiotani et al. (2007) eine vielversprechende Methode für eine 3D-Detektion des Rissflankenverbundes.

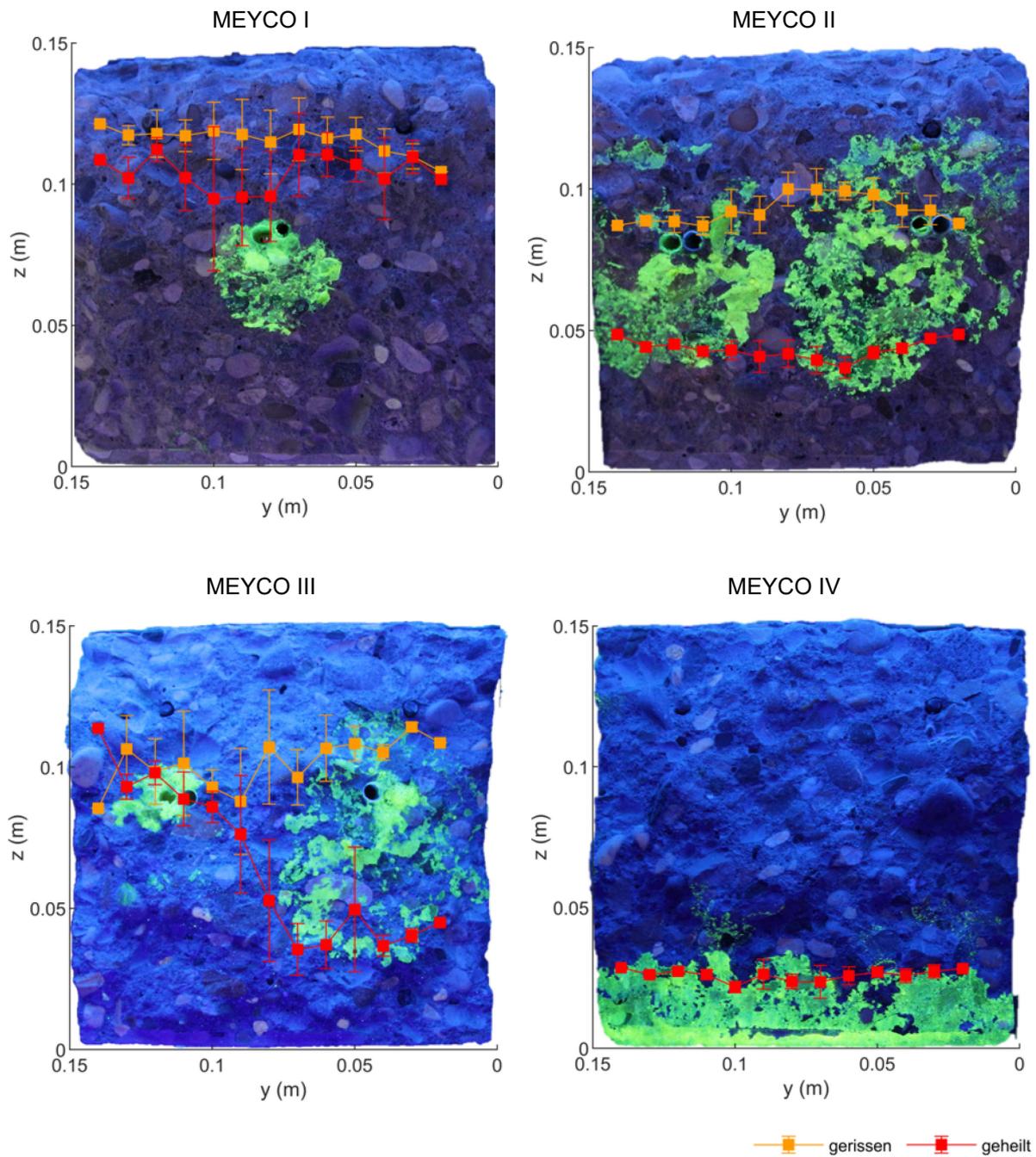


Abbildung 6-9: Risstiefenbestimmung für „MEYCO“-Betontestkörper mit dem ToFD-Verfahren (tomographischer Ansatz) nach der Rissinitiiierung sowie nach der Heilungsphase. Zur besseren Übersicht sind die jeweils 13 Messpunkte je Querschnitt miteinander verbunden dargestellt.

### 6.1.3 Ultraschall: In situ

Für das Monitoring des Verfüll- und Aushärteprozesses der Betonbalken mit „MEYCO“ wurde ein vorkonfiguriertes Messsetup der Firma SMARTMOTE verwendet, welches ursprünglich für die Überwachung des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens von zementgebundenen Werkstoffen konzipiert wurde. Vorteil dieses Systems ist, dass es bereits für Langzeitmessungen erprobt ist und die einzelnen elektronischen Messkomponenten aufeinander abgestimmt sind. Die Vorverstärker-Spannung lässt sich auf 800 V regeln, dies führte in Kombination mit dem verwendeten Schwerwellensensorpaar Olympus Panametrics V150-RB ( $\varnothing$  25 mm, Mittenfrequenz: 250 kHz) zu einer amplitudenstarken Schallinitiierung in das Prüfobjekt. Die In-situ-Messung wurde in Balkenlängsrichtung in direkter Transmission durchgeführt, wobei die Sensoren an den Balkenenden mit Heißkleber für eine dauerhafte Ankopplung angebracht wurden. Wie in Kapitel 4.1.3 bereits messtechnisch validiert, bietet der Korrelationskoeffizient als Auswerteparameter die notwendige Systemvoraussetzung hinsichtlich der Berücksichtigung von statistischen und systematischen Fehlern innerhalb der Messkette sowie von versuchsbedingten Relaxationsprozessen. Da die Testkörper während der Heilungsphase in einer Klimakammer mit kontrollierten Temperatur- und Feuchterege lung lagerten (20 °C, 65 % rel. LF), kann von gleichbleibenden Aushärtebedingungen sowie eines konstanten Vernetzungsgrades des Polyurethans ausgegangen werden. Die Versuchs- und Messparameter finden sich in Tabelle 0-10 (Appendix C). Der Zeitversatz zwischen Ende der initialen Biegeprüfung und Start der In-situ-Messung betrug für die Testkörper „MEYCO I“ 200 Minuten, für „MEYCO II“ 99 Minuten und für „MEYCO III“ 68 Minuten. Diese Zeitspannen umfassten sämtliche weitere zerstörungsfreien Prüfungen sowie Umbaumaßnahmen des Messaufbaus.

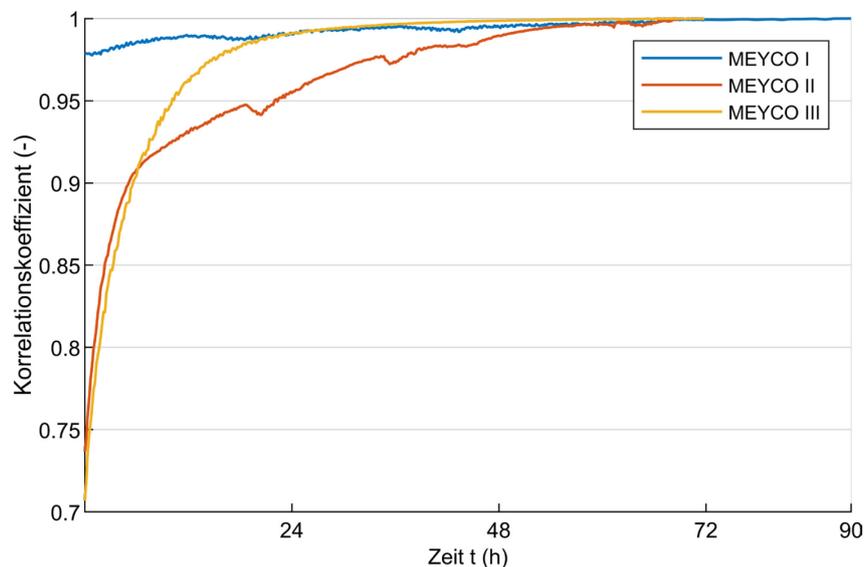


Abbildung 6-10: Ultraschall In-situ-Messung während der Heilungsphase von MEYCO-Betontestkörpern mit eingebetteten Glaskapillaren.

Die Dauer des Langzeit-Monitorings variierte zwischen 69-90 h und wurde beendet, nachdem keine merkliche Signalveränderung mehr feststellbar war. In Abbildung 6-10 sind die entsprechenden Kurvenverläufe des sich entwickelnden Korrelationskoeffizienten der einzelnen Testkörper über die

Zeit aufgetragen. Als Ausgangswert der Berechnung dient der Endwert jeder individuellen Datenauszeichnung, welcher zuletzt immer den Wert „1“ annimmt.

Während „MEYCO II“ und „MEYCO III“ zu Beginn einen starken Anstieg verzeichnen, welcher innerhalb von 24 h von 0,74 auf 0,99 bzw. in 48 h von 0,7 auf 0,99 ansteigt, bleibt der Koeffizient für „MEYCO I“ mit einer maximalen Differenz von 0,02 relativ konstant. Dieses Verhalten bzw. die Differenzen korrelieren sehr gut mit dem Verfüllgrad (Abbildung 6-9) und würden einem zuverlässigen Ansatz einer quantitativen Beurteilung der Heilungseffizienz entgegenkommen. Ebenso könnte sich das gleichzeitige Verfüllen mittels beider Kapillarenpaare von „MEYCO II“ gegenüber „MEYCO III“ mit dem zeitlich schnelleren Kurvenanstieg begründen lassen. Diese Resultate geben einen zuversichtlichen Trend hinsichtlich einer qualitativen Selbstheilungsbeurteilung für Betonprüfkörper im Labormaßstab.

#### 6.1.4 Schwingungsanalyse

Die Resonanzfrequenzbestimmung der Betontestkörper mit longitudinaler, flexuraler und torsionaler Anregung erfolgte mit dem Impakthammer des Typs 8204 von Bruel & Kjaer sowie einem uniaxialen Beschleunigungssensor von PCB Piezotronics (Model 352C33), welcher mit einem applikationsspezifischen Wachs (Petro Wax) angekoppelt wurde. Der Messaufbau entspricht Abbildung 5-26, sodass der Testkörper mit der Kerbe nach oben lag. Als Unterlage diente ein Schaumstoff, nachdem Vorversuche mit einem freischwingenden System an Schnüren zeigten, dass unter beiden Lagerungsbedingungen die gleichen Resonanzwerte erzielt wurden. Um einen Kompromiss aus schnellstmöglicher Messdurchführung, Messgenauigkeit und Repräsentativität der Resultate zu finden, wurden je Schwingungsmoden zwei separate Einzelmessungen mit An- und Abkopplung mit jeweils fünf Einzelanregungen durchgeführt. Durch eine Aufsummierung der Mehrfachanregung innerhalb einer Einzelmessung bildete sich eine deutlichere Resonanzfrequenz aus. Die zweifache Messdurchführung gibt dabei die Reproduzierbarkeit über eine Standardabweichung wieder. Wie schon in Kapitel 4.3 erwähnt, konnte aufgrund der eingebrachten Bewehrung nicht mehr von einem homogenen Testkörper ausgegangen werden. Eine Umrechnung der Frequenzen in Materialkennwerte wäre mathematisch nicht korrekt.

Die Datenauswertung ermöglichte neben der Berechnung der Grundschnwingungen aller Schwingungsmoden auch eine Ermittlung der 1. Oberschnwingung der flexuralen und torsionalen Anregung. Die 1. Oberschnwingung der longitudinalen Anregung konnte innerhalb der Frequenzantwortfunktion nicht eindeutig zugeordnet werden. Aufgrund einer fehlerhaften Datenerfassung im gerissenen Zustand sind für den Testkörper „MEYCO I“ keine Ergebnisse vorhanden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-11 als Balkendiagramm, nach Anregungsmoden sortiert, dargestellt.

Die Resonanzfrequenzen des initialen Zustandes sind innerhalb einer Schwingungsmoden für alle Betontestkörper sehr ähnlich, wobei die 1. flexurale Oberschnwingung mit einer Abweichung von 33 Hz die größte Schwankung aufzeigt. Nach der Rissinitiierung fällt die Resonanzfrequenz um bis zu 50 % (für flexurale Grundschnwingung) vom initialen Ausgangswert ab. Die Standardabweichungen in den Grundmoden liegen bei 248 Hz (flexural), 69 Hz (longitudinal) und 131 Hz (torsional). Jedoch

unterscheidet sich das Frequenzverhältnis der Testkörper von Mode zu Mode, sodass keine qualitativ einheitliche Schadensanalyse abgegeben werden kann.

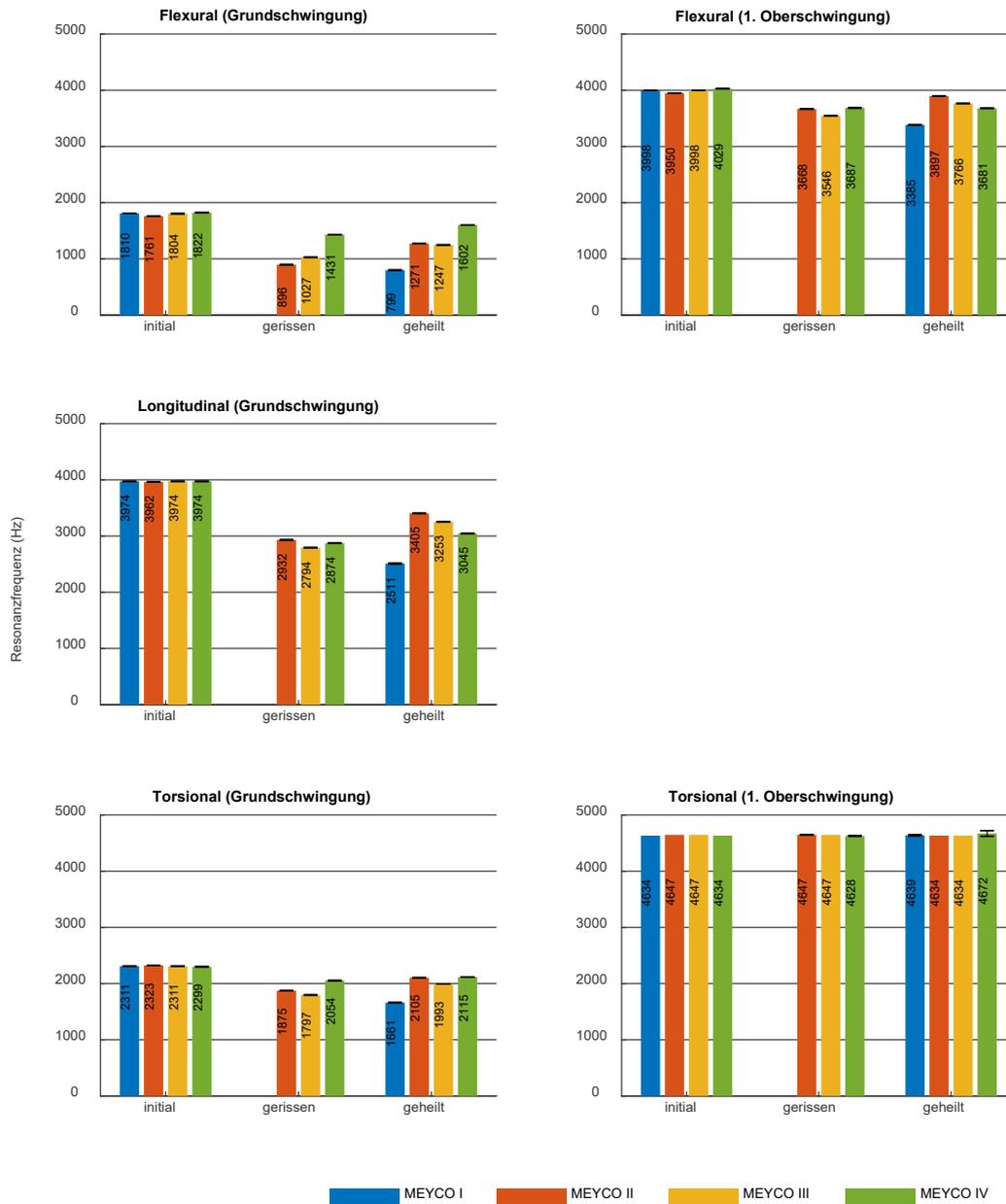


Abbildung 6-11: Flexurale und torsionale Resonanzfrequenzen in der Grund- bzw. 1. Oberschwingung der MEYCO-Betontestkörper zu den unterschiedlichen Zuständen (initial, gerissen, geheilt). Mittelwert und Standardabweichung wurden aus jeweils drei Einzelmessungen gebildet.

Der verhältnismäßig geringe Frequenzabfall der torsionalen Resonanzfrequenz beruht vermutlich auf der hohen Torsionssteifigkeit der Betonbalken aufgrund der Längsbewehrung. Während in der torsionalen Grundschwingung noch eine eindeutige Reduktion erkennbar ist, lässt sich mit der 1. torsionalen Oberschwingung keine Rissinitiation mehr detektieren. Ein ähnliches Verhalten zeichnet sich auch in der 1. Oberschwingung der flexuralen Anregung ab, wobei in diesem Fall noch ein Abfall von bis zu 11 % (für „MEYCO III“) ersichtlich ist. Daher ist davon auszugehen, dass in höheren

Anregungsmoden das Schwingungsverhalten immer stärker von der Bewehrung dominiert wird und eine Schadens- bzw. Selbstheilungsanalyse unbrauchbar macht.

Während mit einer erfolgreichen Rissverschließung die Grundfrequenzen aller Testkörper steigen, gilt dies innerhalb der flexuralen Oberschwingung nur für „MEYCO II/III“. Die manuelle Verfüllung von „MEYCO IV“ weist hingegen einen leichten Rückgang von wenigen Hertz auf. Ähnliches gilt für die torsionale Oberschwingung, bei der „MEYCO I-IV“ über alle Zustände hinweg nahezu die gleichen Resonanzfrequenzen aufweisen. Folglich ist eine Betrachtung der ersten Oberschwingung kein zuverlässiges Mittel zur Charakterisierung einer Schädigung bzw. einer Rissverschließung.

Identisch zum gerissenen Zustand, schwankt das Verhältnis des Wiederanstiegs zwischen den Testkörpern und den Schwingungsmoden in der Grundanregung. Auch wenn für „MEYCO I“ keine Daten im gerissenen Zustand vorhanden sind, die konstant niedrigen Resonanzfrequenzen im geheilten Zustand, welche ähnlich denen im gerissenen Zustand sind, bestätigen die nicht vorhandene Rissverfüllung. Die Bestimmung einer Selbstheilungseffizienz (SHE) innerhalb der Schwingungsanalyse lässt sich, in Übereinstimmung mit [Feiteira 2017] und Van Belleghem et al. (2018), über

$$\text{SHE (\%)} = \frac{f_{(\text{geheilt})} - f_{(\text{gerissen})}}{f_{(\text{initial})} - f_{(\text{gerissen})}} \cdot 100 \quad \text{mit } f = \text{Resonanzfrequenz} \quad \text{Gl. 6-1}$$

definieren.

Die entsprechenden SHE-Werte je Anregungsmode der Grundschwingung sowie die mit PU benetzte Fläche ist in Tabelle 6-5 gegeben. Grün markiert dabei die Schwingungsmoden, bei denen im Gesamtkonzept ein korrelierendes Verhältnis zwischen der Selbstheilungseffizienz und der entsprechenden benetzten Fläche der einzelnen Testkörper vorliegt. Unter Berücksichtigung der manuellen Heilung von „MEYCO IV“ gilt dies für die longitudinale und torsionale Anregung.

Tabelle 6-5: Bestimmung der Selbstheilungseffizienz (SHE) für MEYCO-Betontestkörper nach Gl. 6-1 für alle drei Grundschwingungsmoden (flexural, longitudinal, torsional) sowie der Prozentsatz an benetzter Fläche mit PU nach der Heilung.

	SHE (%)			Benetzte Fläche (%)
	flexural <sub>Grund</sub>	longitudinal <sub>Grund</sub>	torsional <sub>Grund</sub>	
<b>MEYCO I</b>	-	-	-	0
<b>MEYCO II</b>	43	45	51	49
<b>MEYCO III</b>	28	38	38	22
<b>MEYCO IV</b>	43	15	25	15

### 6.1.5 Schallemissionsanalyse

Zur Überwachung der Bruchprozesse im initialen als auch im geheilten Zustand bildeten 15 SE-Sensoren (Olympus Panametrics V103-RB) eine vielfach überbestimmte Sensorabdeckung. Die Limitierung der Signallaufwege auf ein begrenztes Maß sowie die präzisierte Rissinitiierung ermöglichten eine optimale Sensorüberdeckung des zu erwartenden Bruchbilds. Eine schematische Darstellung der verwendeten Sensorabdeckung unter Berücksichtigung der 3-Punkt-Biegevorrichtung ist in Abbildung 6-12 gegeben. Die Sensoranbringung mit Heißkleber sorgte für konstante Ankoppelbedingungen über die volle Versuchsdauer. Das Ablösen der Sensoren erfolgt meist ohne Beschädigung der Betonoberfläche, sodass eine wiederholte und identische Sensorplatzierung für das Wiederbelastungsszenario nach der Heilungsphase möglich war. Kam es in Einzelfällen zu Ablöseeffekten der oberflächennahen Betonmatrix, wurde der Sensor bei der darauffolgenden Prüfung an der nächst freien Stelle angebracht. Die Sensorkoordinaten im Zustand „wiederbelastet“ sind für alle Testkörper in Tabelle 0-11 (Appendix C) gegeben und orientieren sich am Koordinatensystem nach Abbildung 6-12. Die Belastungskurve aus der Prüfmaschine wurde mit dem SEA-Messsystem über einen separaten Signaleingang (TranAX, Elsys AG) synchronisiert aufgezeichnet. Die aus einer Rastermessung mit 285 oberflächlichen US-Impulsen bestimmte Schallausbreitungsgeschwindigkeit beträgt 4770 m/s ( $\pm 145$  m/s). Über eine Bleistiftminen-Kalibrierung nach Hsu (1977) wurde das Messsystem sowie die Sensorankopplung auf Fehler überprüft. Zugleich dienten die künstlichen erzeugten Emissionen als Orientierung für die Trigger- und Signalaufzeichnungsparameter. Die daraus resultierten System- und Messeinstellungen der Datenaufzeichnungssoftware sowie der weiteren Messkettenkomponenten sind in Tabelle 0-12 (Appendix C) ersichtlich.

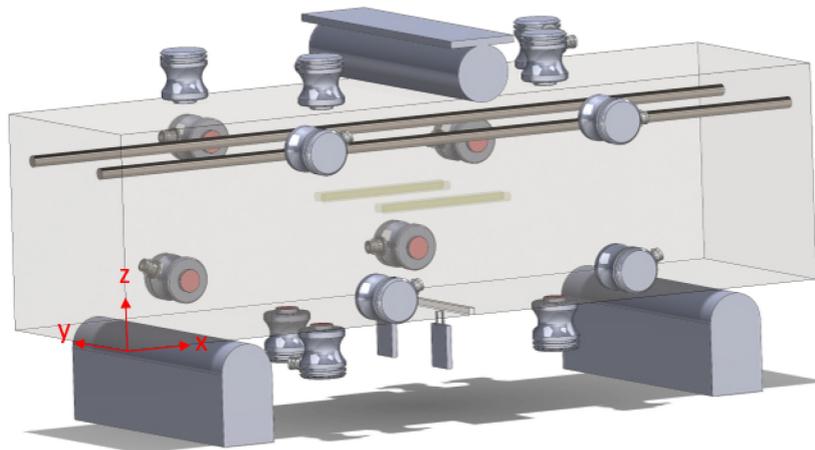


Abbildung 6-12: Schematische Darstellung eines Betontestkörpers mit 15 angekoppelten SE-Sensoren (Panametrics V103-RB), LVDT-Aufnehmern (an Kerbe) und Auflagern der 3-Punkt-Biegevorrichtung. In der Mitte befinden sich zwei Glaskapillarenpaare nach der Anordnung aus Abbildung 6-2.

Die Signalenergie je Event resultiert aus einer Mittelung über alle SE-Sensoren und wird einheitenfrei dargestellt. Da keine versuchsabhängige Sensorkalibrierung erfolgte, ist die Angabe einer Einheit nicht aussagekräftig (vgl. Kapitel 4.4). Innerhalb einer Messdurchführung war dennoch ein quantitativer

Vergleich gegeben, was eine energiebasierte Selektierung der Events ermöglichte. Für die Ergebnisdarstellung sind nur lokalisierbare SE-Events, welche sich innerhalb der Testkörpergeometrie befinden, in der Auswertung berücksichtigt worden. Dies führte meist zu einer starken Dezimierung, reduzierte aber zugleich die Fehleranfälligkeit einer weiterführenden parameterbasierten Analyse. Die Anwendung eines Mindestkorrelationskoeffizienten, welcher die Güte der Steigung zwischen den gemessenen Ankunftszeiten sowie den Distanzen zwischen Sensor und Quellherdkoordinaten bewertet, grenzt die Ergebnisse weiter ein [Raith 2013]. Die Verwendung eines Korrelationskoeffizienten hat den Vorteil, dass dieser aufgrund einer Normierung einheitenfrei ist. Folglich wird für eine Fehlereingrenzung keine genaue Kenntnis von material- und systemspezifischen Kennwerten mit Absolutwerten benötigt. Der Nachteil jedoch ist, dass der Korrelationskoeffizient sehr sensibel auf Streueffekte und Ausreißer reagiert, was besonders innerhalb des Bancroft-Verfahrens mit Permutationsansatz der Fall sein kann (Kapitel 4.2.2). Es betrifft sowohl eine Über- als auch eine Unterbewertung der linearen Regressionsfunktion und erschwert einen direkten Vergleich mit den Resultaten aus der iterativen Geiger-Methode [Anscombe 1973]. Daher ist es für ein homogenes Geschwindigkeitsfeld hilfreich, einen Versuchsaufbau mit einer Vielzahl an SE-Sensoren mit möglichst asymmetrischen Sensorpositionen zu konzipieren, um die Grundgesamtheit der Funktion zu erhöhen. Auf diesen Annahmen basierend, wurde der Korrelationskoeffizient für das analytische Verfahren mit Permutationsansatz nach Bancroft (1985) auf 0,5 und auf 0,8 für das iterative Verfahren nach Geiger (1910) festgelegt. Zusätzlich mussten mindestens 40 der 1365 möglichen Sensor-Permutationskombinationen das Lokalisierungsergebnis bilden, dies entspricht einer Mindestanzahl von acht unterschiedlichen Ersteinsätzen je Event. Da das Bancroft-Verfahren meist mehr Lokalisierungsergebnisse detektiert, wird in den folgenden Abbildungen auf die Darstellung der Ergebnisse nach Geiger (1910) verzichtet.

Für die Auswertung der SEA-Daten aus der Wiederbelastung gilt es vorab zu berücksichtigen, dass die Testkörper wiederholt bis zu einer Rissweite von circa 1 mm beansprucht wurden. Dies bewirkte, aufgrund der irreversiblen Vorschädigung, eine erweiterte Durchbiegung des Balkens. Das zunehmende Biegemoment kann nach Überschreiten der maximalen Beanspruchung aus der initialen Belastung zu einer zusätzlichen Rissfraktur und zu einem Kaiser-Effekt führen [Grosse 1996]. Detaillierte Untersuchungen des zementgebundenen Schädigungsverhaltens hinsichtlich des Kaiser-Effektes bzw. des Felicity<sup>26</sup>-Verhältnisses wurde nicht vorgenommen. Ausführliche Studien zu diesem Thema finden sich u. a. in Tsangouri et al. (2019a), Vidya Sagar et al. (2015).

Die Triggerung einer Aktivierung der Selbstheilung ist exemplarisch in Abbildung 6-13 gegeben. Eine energiebasierte Selektierung der SE-Events des initialen 3-P-Biegeversuchs („MEYCO I“) mit anschließender Lokalisierung zeigte, dass die Glaskapillarenbrüche eine deutlich höhere Bruchenergie emittieren als das Betongefüge. Das hohe S/N-Verhältnis führte zu sehr präzisen Ortsbestimmungen mit relativ geringen Mislokalisationsvektoren (Ellipsendarstellung). Dieses Bruchverhalten korreliert mit den Erkenntnissen aus Tsangouri et al. (2013), Tsangouri et al. (2017). Darin wird ebenfalls validiert, dass eingebrachte Glaskapillaren eine unterstützende Wirkung auf die Widerstandsfähigkeit des

---

<sup>26</sup> [Grosse et al. 2008]

Belastungsszenarios haben. Dies würde auch den zeitlichen Versatz der registrierten Schallemissionen in Abbildung 6-13 begründen.

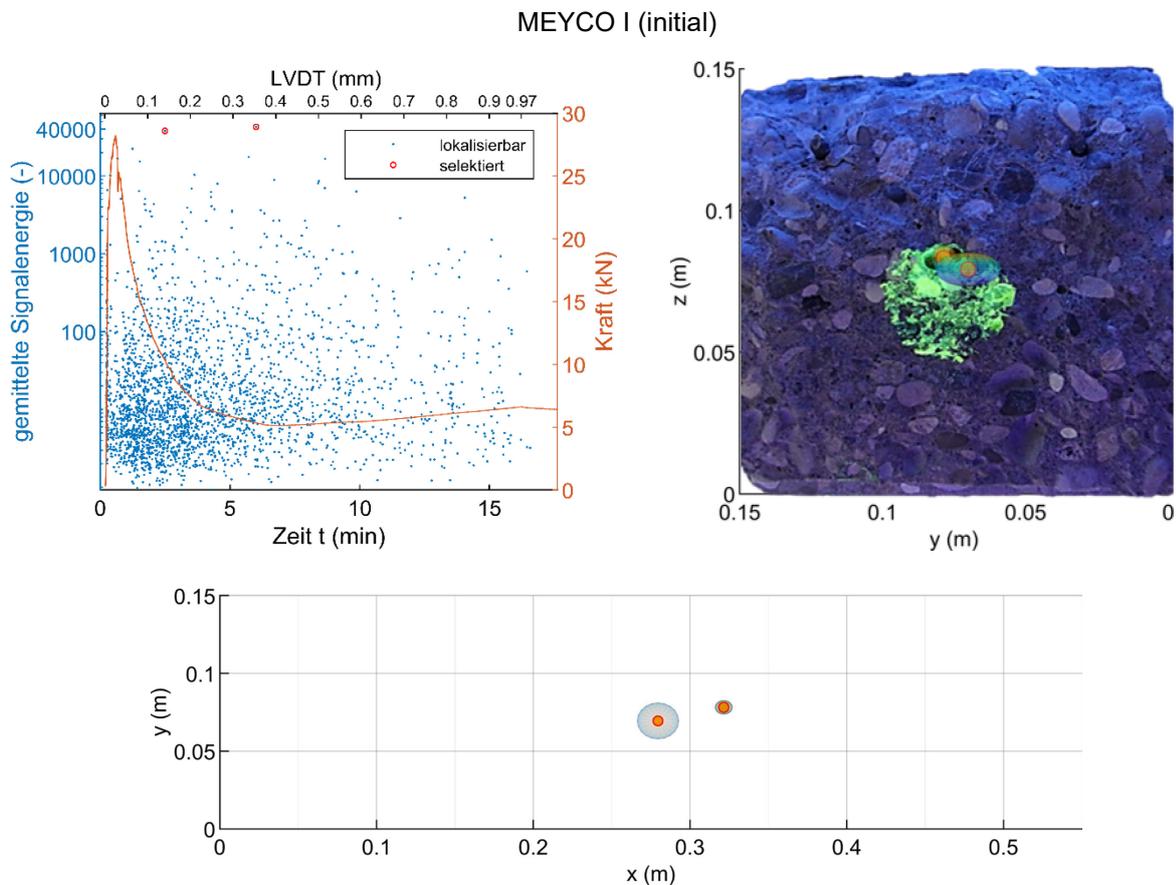


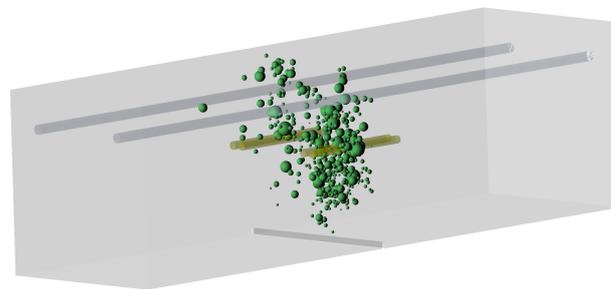
Abbildung 6-13: Zeitabhängiges SE-Auftreten sowie der parallel aufgezeichnete Kraftkurvenverlauf während des initialen rissweitengesteuerten 3-P-Biegeversuchs von Testkörper „MEYCO I“ (links, oben). Die Selektierung der SE-Events (Bancroft-Verfahren) über die gemittelte Signalenergie (rot markiert) führt zu einer Lokalisierung der eingebetteten Glaskapillaren im mittigen Testkörperbereich (rechts, oben und unten). Die Ellipse um den Quellherd bildet sich aus dem maximalen Mislokalisationsvektor je Koordinatenachse (siehe Kapitel 4.2.1).

Die parameterbasierten SEA-Ergebnisse aus der Wiederbelastung nach siebentägiger Aushärtung sind in Abbildung 6-14 gegeben. Abbildung 6-15 und Abbildung 0-8 (Appendix C) zeigen die Lokalisierungsergebnisse in Kombination mit einem Realbild der Bruchzone sowie eine Konvertierung in eine 3D-Darstellung. Die Größe der Lokalisierungspunkte in Abbildung 6-15 und Abbildung 0-8 steht in einem logarithmischen Verhältnis zur gemittelten Signalenergie. Die Datenaufzeichnung von Testkörper „MEYCO II“ erfolgte abweichend über ein Ersatzmesssystem, wodurch es zu veränderten Triggereinstellungen kam. Bedingt durch eine „robustere“ Triggerschwelle wurden folglich bedeutend weniger SE-Events detektiert.

Die erfolglose Heilung von „MEYCO I“ spiegelte sich auch in der SE-Aktivität wieder, welche im Vergleich zu den anderen Testkörpern wesentlich geringer ist. Da kein kraftschlüssiger Verbund vorhanden war, dies wird ebenfalls durch die Kraftkurve bestätigt, lassen sich die Emissionen durch Scher- und Reibeffekte an den Rissflanken erklären. Ab einer Rissweite von circa 0,6 mm ( $t=10$  min) steigt die Anzahl der SE-Events, welche sich im oberen Drittel ( $z>0,1$  m) lokalisieren lassen. Da es ab

diesem Zeitpunkt zu einer Überschreitung der zuvor aufgetragenen Materialbelastung kam (vgl. Abbildung 6-4), lässt sich dies mit dem zuvor erwähnten Kaiser-Effekt begründen. Eine weitere Auffälligkeit bei „MEYCO I“ sind zwei Lasteinbrüche bei  $t=13,1$  min und  $t=15,3$  min, welche mit energiereichen SE-Events aufgrund von vermutlich erneuten Kapillarfrakturen einhergehen (Abbildung 0-9, Appendix C). Dieser Effekt ist ebenfalls bei „MEYCO III“ sichtbar.

Die unterschiedliche Benetzung des PUs der manuellen Verfüllung von „MEYCO IV“ sowie der kapillarbasierten Heilung von „MEYCO II/III“ lässt sich mit den SEA-Ergebnissen sehr gut differenzieren. Die Flächen der fluoreszierenden Pigmente decken sich sehr präzise mit den Lokalisierungen der SE-Events. Obwohl „MEYCO II/III“ eine über den Querschnitt größere Menge an verteiltem Heilmittel aufweisen und eine größere Verteilung in z-Richtung vorliegt, löst sich der kraftschlüssige Verbund zunächst sehr lokal auf Kapillarenhöhe und wandert anschließend stetig mit Zunahme der Rissweite nach oben. Dieses zu Beginn komplexe und ungleichmäßige Ablöseverhalten spricht für das PU-spezifische Elastizitätsverhalten, welches wiederum von der Schaumbildungsreaktion beeinflusst wird. Eine detaillierte Darstellung zeigt Abbildung 0-10 (Appendix C) sowie die 4D-Darstellung (3D + Zeit) in Video 1 bzw. im pdf-Anhang. Die starke SE-Clusterbildung von „MEYCO IV“ innerhalb der ersten vier Minuten kann eindeutig einem Verbund in Kerbennähe zugeordnet werden (Abbildung 0-11, Appendix C). Die darauffolgenden aufgezeichneten Events beruhen, identisch zu „MEYCO I“, auf Reib- und Schereffekten an den Rissflanken. Zudem können auch SE-Lokalisierungen im oberen Randbereich auf Reib- und Kontaktprozesse durch das Schwert der Prüfmaschine (Auflager) zurückzuführen sein. Aufgrund ähnlicher Energiewerte ist eine parameterbasierte Differenzierung von den zuvor aufgetretenen Bruch- und Ablösemechanismen des Polyurethans nicht möglich. Weitere Auswertemethoden, wie z. B. Peakfrequenz oder Rise Angle (RA) [Carpinteri et al. 2013, Carpinteri et al. 2016, Ohno 2015] erlaubten keine eindeutige Klassifikation einzelner Bruchprozesse. Eine exemplarische Auswertung ist für Testkörper „MEYCO IV“ in Abbildung 0-12 (Appendix C) dargestellt. Dabei wurden alle Einzelsignale je Sensor und SE-Event vor  $t=4$  min sowie  $z<0,05$  m den Bruchprozessen des PUs und für  $t<4$  min sowie  $z>0,05$  m zusätzlichen Reib- und Deformationseffekten der Betonmatrix zugeordnet.



Video 1: 4D-Darstellung der SEA von MEYCO III während der Wiederbelastung durch einen rissweitengesteuerten 3-P-Biegeversuch (vgl. Abbildung 6-14). Die Video-Wiedergabe erfolgt in 20-facher Geschwindigkeit.

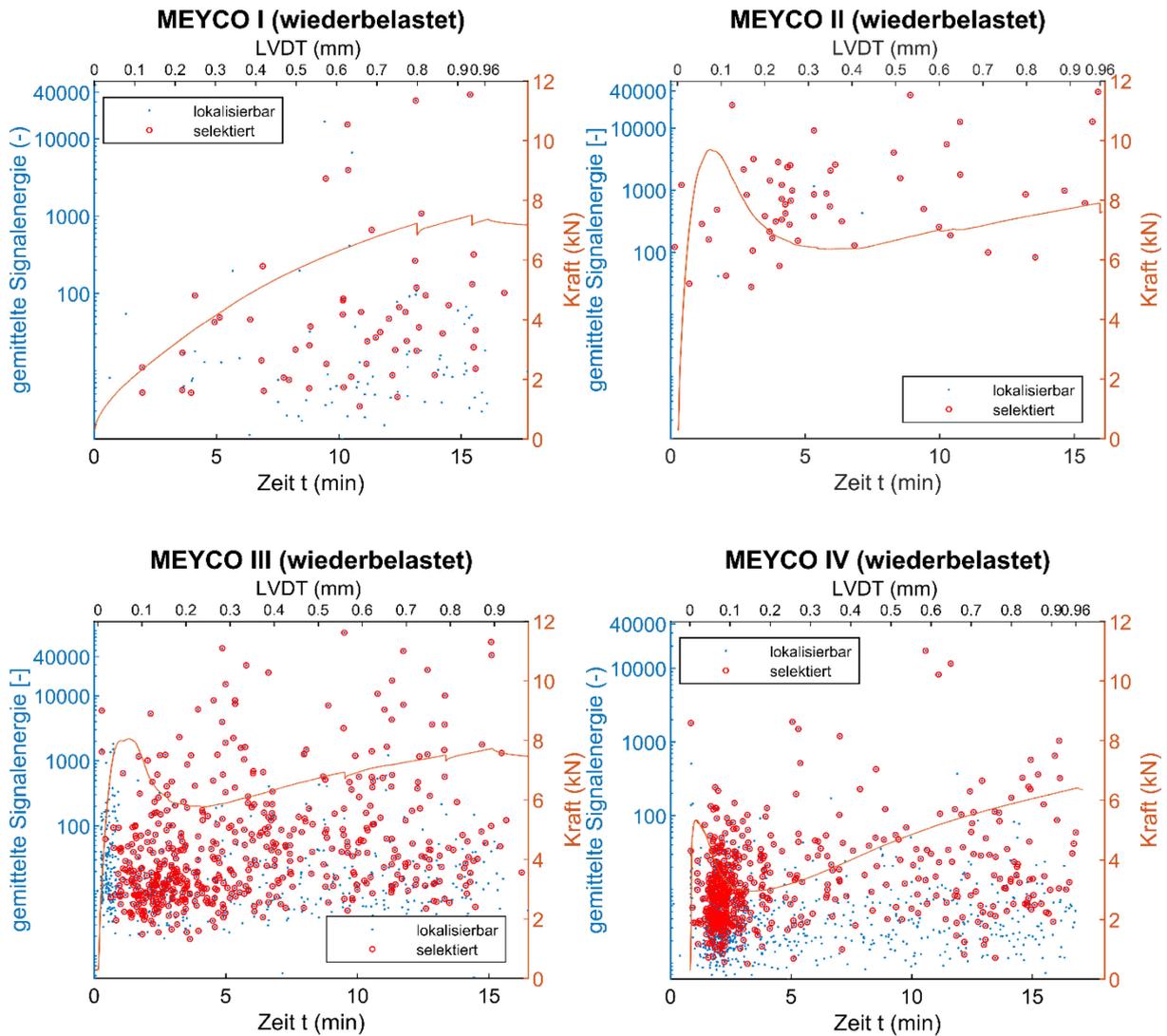


Abbildung 6-14: Zeitabhängiges SE-Auftreten sowie des Kraftkurvenverhaltes während der Wiederbelastung durch einen rissweitengesteuerten 3-P-Biegeversuch für Betontestkörper „MEYCO I-IV“. Die Selektierung (Bancroft-Verfahren) wurde bestimmt durch den Korrelationskoeffizient (0,5) und der Mindestanzahl an Permutations-Ergebnissen (> 40).

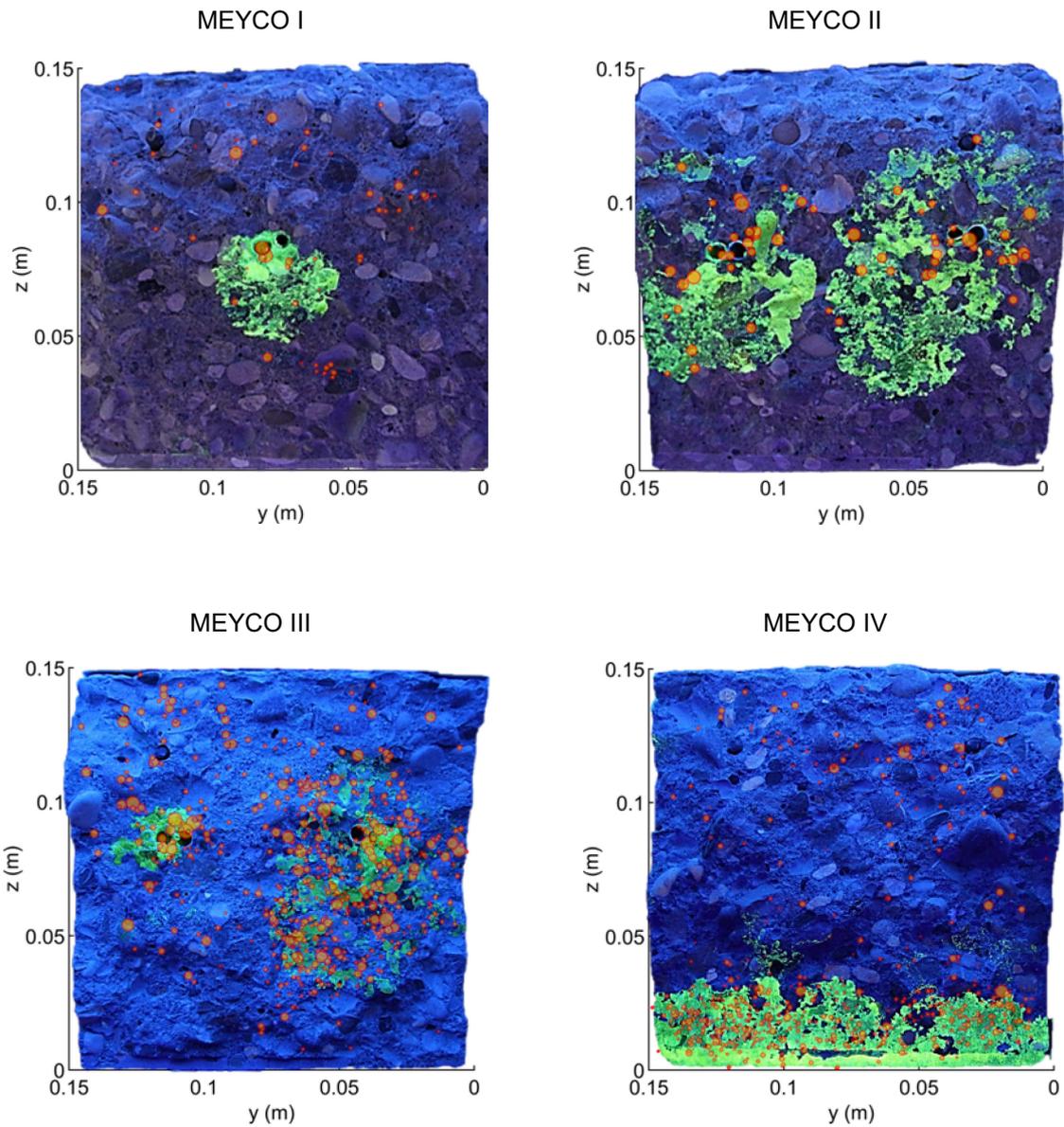


Abbildung 6-15: Lokalisierungsdarstellung der selektierten SE-Events der einzelnen „MEYCO“-Testkörper aus der vorherigen Abbildung 6-14 mit dem Bancroft-Verfahren in der y-z-Ebene. Die Größe der Kreise steht in einem logarithmischen Bezug zur gemittelten Energie über alle relevanten Sensoren je SE-Event. Die im Hintergrund befindliche Querschnitts-Rissfläche lässt einen Vergleich mit der autonomen Verfüllung des PUs durch die Glaskapillaren zu.

## 6.2 Betontestkörper mit SLV

Die Untersuchung von Betontestkörpern mit eingebrachten Glaskapillaren, welche das Polyurethan „SLV“ enthalten, baute auf bereits vorangegangenen Studien von [Feiteira et al. 2014] und [Gruyaert et al. 2015] auf. Dabei konnte anhand von Mörtelprismen eine hohe Wiederbelastung mit großen elastischen Dehnungen sowie eine stark abdichtende Rissverschließung nachgewiesen werden. Fortführend sollten nun, in Kooperation mit der Universität Gent, die Verfüll- und Aushärtecharakteristika des sehr niedrigviskosen Heilmittels innerhalb einer Betonmatrix mit Kieszuschlägen analysiert werden. Eine Auflistung der fünf beschriebenen Testkörper ist in Tabelle 6-6 gegeben.

Tabelle 6-6: Übersicht der individuellen Betontestkörper mit Polyurethan-basierter („SLV“) Heilung.

Polyurethan (SLV)	
SLV I / II / III / IV	REF
4 Kapillarenpaare	4 Kapillarenpaare (ungefüllt)

### 6.2.1 Versuchsdurchführung

Der konzeptionelle Aufbau der Betontestkörper mit dem verwendeten Polyurethan HA Flex SLV ist in Abbildung 6-16 gezeigt. Die Herstellung der Testkörper wurde von Partnern der Universität Gent (Belgien) im Rahmen eines Europäischen Forschungsprojekts übernommen. Das Betonrezept ist in Tabelle 6-2 gegeben. Als Bewehrung kamen zwei Eisenstäbe mit  $\varnothing$  6 mm zum Einsatz. Insgesamt wurden je Balken vier Glaskapillarenpaare mit 10 cm Länge ( $\varnothing$  3,3 mm, Wandstärke 0,18 mm) nebeneinander in einer Reihe eingebracht. Die Fixierung der Kapillaren, um eine konstante Positionierung während der Frischbetoneinbringung und der anschließenden Verdichtung zu gewährleisten, erfolgte mit gespannten Nylonschnüren zwischen den Schalungswänden. Als luftdichte Verschließung der Kapillaren diente PMMA<sup>27</sup>-Kleber. Ein Betonbalken mit ungefüllten, leeren Kapillaren fungierte dabei als Referenztestkörper („REF“). Die Ausschalung erfolgte nach 24 Stunden mit einer anschließenden 28-tägigen Unterwasserlagerung sowie einer folgenden Trocknung in einer Klimakammer (20°C und 60 % rel. LF). Um eine saubere und glatte Oberfläche für die Ankopplung der Ultraschallsensoren zu erhalten, musste, im Gegensatz zur „MEYCO“-Testserie, die raue „Füllseite“ um 5 cm abgesägt werden. Zusätzlich wurde die Unterseite mit niedrigviskosem Epoxidharz beschichtet. Die sehr dünne Versiegelung optimierte eine gleichmäßige Sensorankopplung mit Heißkleber und erhöhte aufgrund der oberflächigen Porenverdichtung den Energieeintrag. Eine 5 mm tief gesägte Kerbe in Testkörpermitte leitete eine standardisierte und ortsgezielte Rissinitiierung ein.

<sup>27</sup> Polymethylmethacrylat (PMMA)

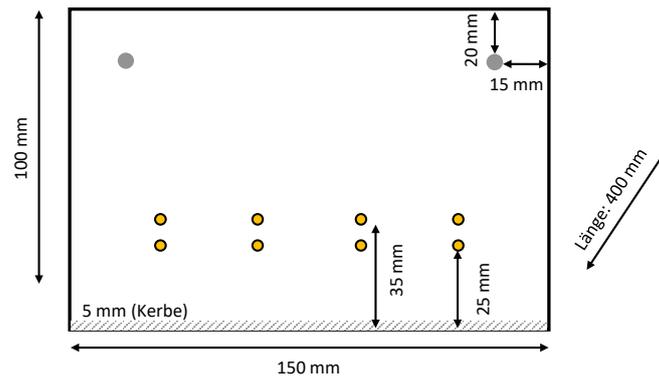


Abbildung 6-16: Schematischer Aufbau der bewehrten (grau) Betonbalkenserie „SLV“ mit Polyurethan-gefüllten Glaskapillaren (hier: 8 Glaskapillare - gelb markiert).

Der Belastungs- und Messablauf ist in Abbildung 6-1 gegeben. Der initiale 3-P-Biegeversuch erfolgte rissweitengesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,1 mm/min bis zu einer finalen Rissweite von 1,0 mm. Nach Entlastung führte dies zu einer Rissöffnung zwischen 300-400  $\mu\text{m}$ . Zur Aushärtung lagerten die „SLV“-Testkörper mit der Rissöffnung nach unten zeigend in einer Klimakammer (20 °C, 65 % rel. LF). Um einen vollständigen Bruch während der Wiederbelastung aufgrund des reduzierten Querschnittes von 150 cm<sup>2</sup> („MEYCO“-Testkörper: 225 cm<sup>2</sup>) zu verhindern, wurde der zweite 3-P-Biegeversuch auf 0,5 mm begrenzt. Somit konnte eine Überschreitung der maximalen Anfangsbeanspruchung unterbunden werden (Abbildung 6-17). Dass es zu vollständigen Kapillarbrüchen mit einer gefolgt Rissverfüllung kam, konnte während des initialen 3-P-Biegeversuchs direkt an der Testkörperoberfläche beobachtet werden. In Abbildung 6-18 ist gezeigt, wie das sehr niedrigviskose Heilmittel durch die kapillaren Saugkräfte bis nahe an die obere Risspitze aufsteigt. Die sehr flächendeckende Verteilung des Heilmittels im Riss ist sehr deutlich in Abbildung 6-19 für jeden Testkörper ersichtlich. In Abbildung 6-20 sind die Kraft- Rissöffnungskurven aus der initialen und wiederholten Beanspruchung nach drei Tagen Aushärtung sowie die entsprechenden Spitzenlasten als Balkendiagramm dargestellt. Während der initiale 3-P-Biegeversuch Maximalbeanspruchungen zwischen 11,0-12,5 kN hervorbrachte, schwankten die Spitzenlasten nach einer erfolgreichen kraftschlüssigen Rissverschließung zwischen 5,2-11,43 kN. Im Gegensatz zu den manuell mit „SLV“ verfüllten Mörtelprismen in Kapitel 5.1 hat die Verfüllung die Zugfestigkeit der Betonmatrix nicht überschritten, sodass augenscheinlich keine neuartigen Rissformationen entstanden sind. Das Verhältnis der Spitzenlasten zwischen der initialen Biegebeanspruchung und der Wiederbelastung sowie der benetzten Querschnittsfläche mit „SLV“ ist in Tabelle 6-7 gegeben. Auch hier zeigt sich der Trend, dass mit zunehmender Rissverfüllung eine Steigerung der Wiederbelastung auftritt. Eine Betrachtung des materialspezifischen Dehnungsverhaltens des ausgehärteten Polyurethans (vgl. Kapitel 5.1), ist aufgrund der nicht-linearen Steigung des Kraft-Rissöffnungsverhaltens nicht möglich gewesen.

Tabelle 6-7: kraftbasierte Heilungseffizienz und benetzte Fläche mit PU der SLV-Testserie.

	SLV I	SLV II	SLV III	SLV IV	REF
<b>Kraftbasierte Heilungseffizienz (%)</b>	91	82	43	80	-
<b>Benetzte Fläche mit PU (%)</b>	69	60	57	62	-

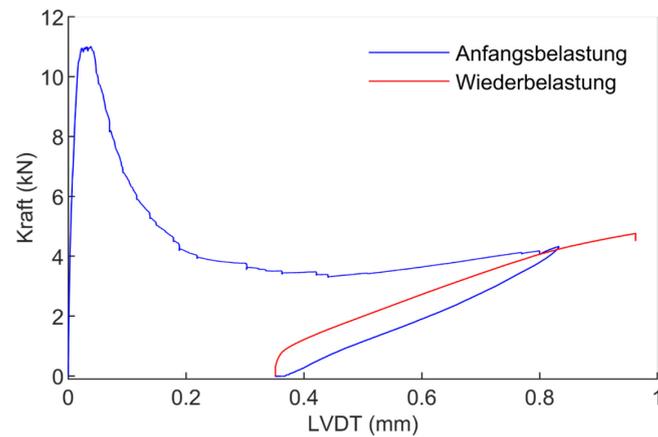


Abbildung 6-17: Exemplarisches Kraft-Rissöffnungsverhalten eines Referenztestkörpers ohne PU-Kapillaren. Rissöffnungsgesteuertes Belastungsszenario mit LVDT-Aufnehmern bis maximal 1,0 mm. Wiederbelastung erfolgt nach vollständiger Kraftentlastung bis maximal 0,5 mm.

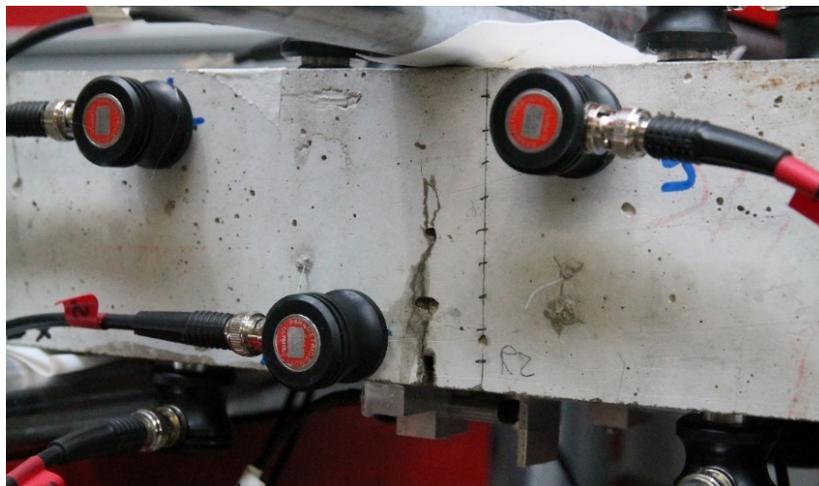


Abbildung 6-18: Initiale Bruchinitiierung via 3-Punkt-Biegeversuch. Wenige Sekunden nach Bruch der Glaskapillaren dringt das PU „SLV“ entlang des Risses an die Testkörperoberfläche. Angebrachte Sensoren dienen der Schallemissionsanalyse.

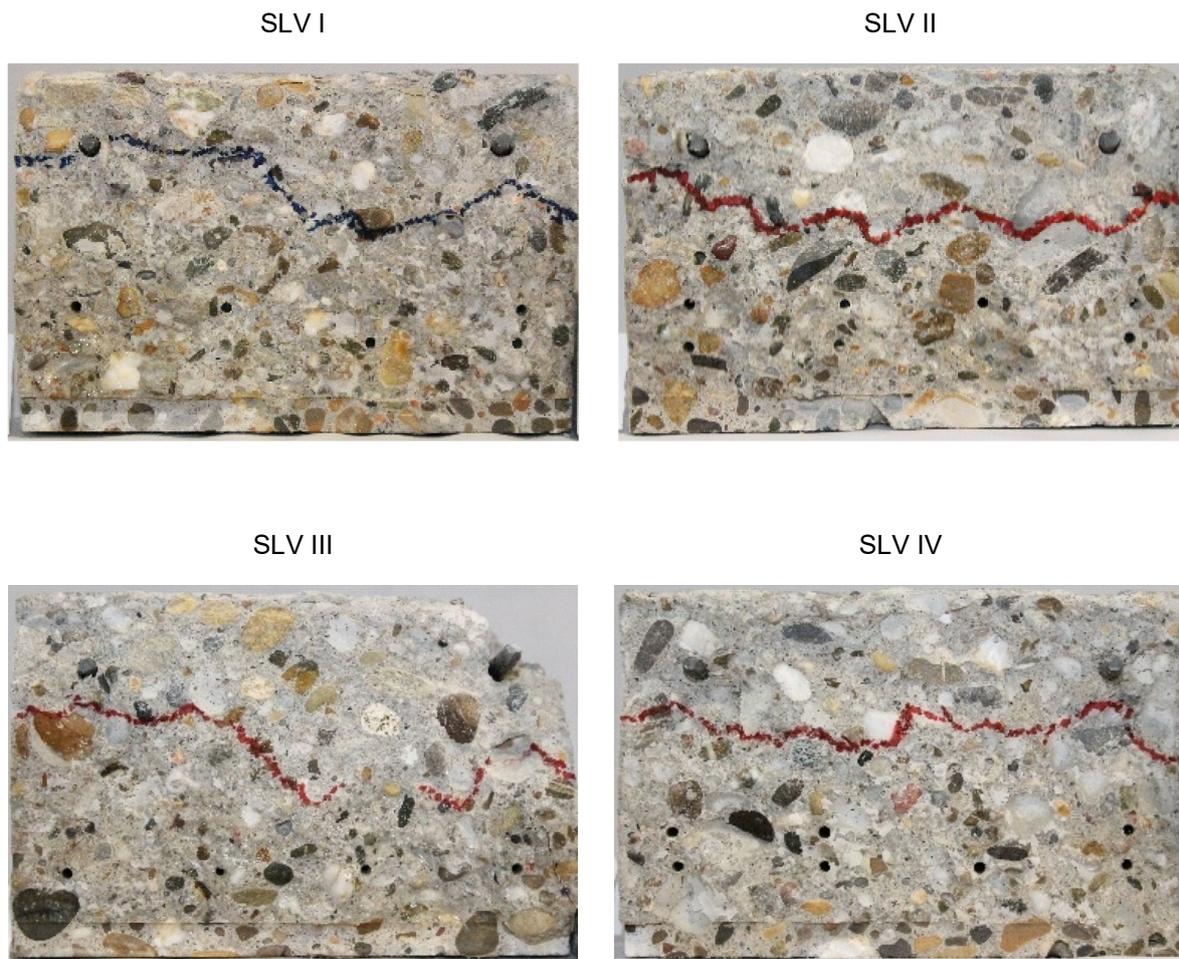


Abbildung 6-19: Querschnittsbilder der SLV-Betontestprüfkörper. Die eingezeichnete Linie markiert die maximale Dispersionshöhe des freigesetzten PUs „SLV“ nach der Bruchinitiierung.

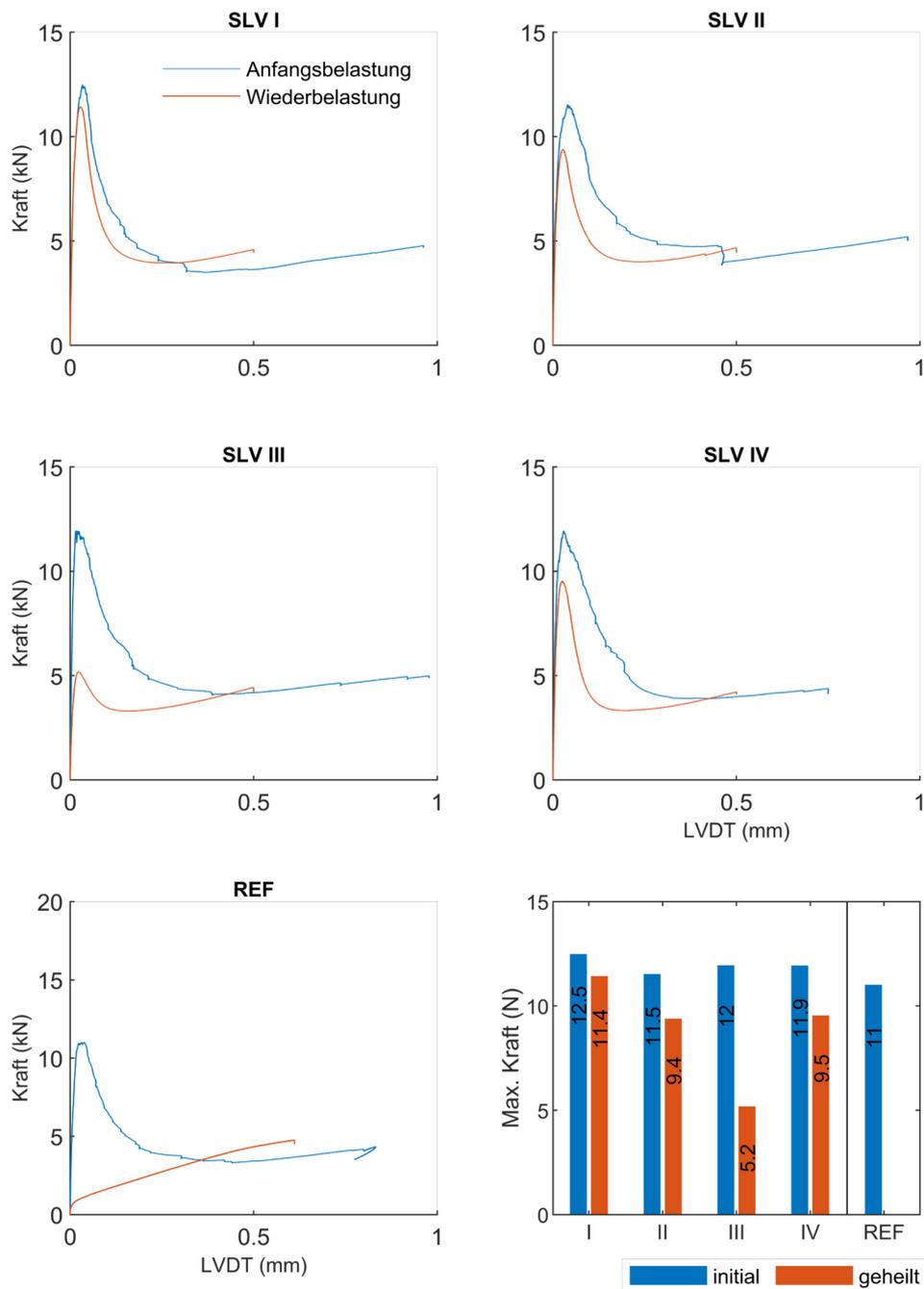


Abbildung 6-20: Kraft-Rissöffnungsverhalten für SLV-Betontestkörper während des initialen 3-Punkt-Biegeversuchs (=Anfangsbelastung) und drei Tage nach der Selbstheilung /Aushärtung (=Wiederbelastung) sowie eine Übersicht über die maximalen Wiederbelastungswerte infolge der Rissverschließung.

### 6.2.2 Ultraschall: ToFD

Der Mess- und Versuchsaufbau zur Bestimmung der Risstiefe nach dem ToFD-Verfahren (Kapitel 4.1.2) entspricht dem schematischen Aufbau aus der „MEYCO“-Testserie in Abbildung 6-7. Die Versuchsdurchführung mit einer händischen Sensorankopplung und einem US-Ankoppelgel, wie in Kapitel 6.1.2 angewandt, hat aufgezeigt, dass die Ersteinsetzbestimmung zu teilweise hohen Standardabweichung führt. Um die Ankoppelbedingungen zu optimieren und die Zuverlässigkeit über

die Risstiefenbestimmung zu erhöhen, wurden Olympus Panametrics V103-RB-Sensoren mit einer konstanten Fixierung über die Messzustände „initial“ und „gerissen“ angewandt. Bedingt durch den Mess- und Systemaufbau wurde ein von der Kerbe ausgehender symmetrischer US-Geber-Empfänger-Abstand von 0,2 m gewählt. Aufgrund des Sensorgehäusedurchmessers konnten über den Testkörperquerschnitt maximal fünf Sensoren angebracht werden. Somit ergaben sich mittels tomografischen Ansatzes (vgl. Abbildung 4-4) insgesamt neun Detektionspunkte mit einem Abstand von 0,03 m (Abbildung 6-21). Die Mess- und Systemeinstellungen sind in Tabelle 0-13 (Appendix D) gegeben.

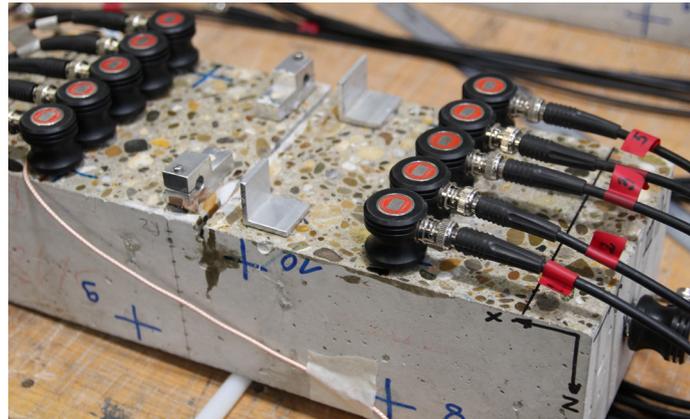


Abbildung 6-21: Sensorplatzierung an SLV-Testkörpern für ToFD-Messung.

Die Bestimmung der Laufzeitdifferenzen zwischen den einzelnen Zuständen erfolgte, identisch zur MEYCO-Testserie, für jede Geber-Empfänger-Kombination individuell in Abhängigkeit der jeweiligen Schallausbreitungsgeschwindigkeit des initialen Zustandes. Da sich die ToFD-Ergebnisse der „SLV“-Testkörper mit gefüllten Glaskapillaren stark ähneln (Abbildung 0-13, Appendix D), sind in Abbildung 6-22 beispielhaft die Risstiefenermittlung von „SLV I“ sowie des Referenztestkörper mit leeren Glaskapillaren dargestellt. Die Verläufe der ermittelten Risstiefen über den Querschnitt zeigen, dass es einerseits nur sehr geringe Laufzeitdifferenzen zwischen dem gerissenen und geheilten Zustand („SLV I“) bzw. nach 24-stündiger Relaxation („REF“) gibt. Andererseits weist nur der Referenztestkörper mit Tiefen zwischen 0,052-0,082 m eine eindeutige Risschädigung nach dem initialen 3-P-Biegeversuch mit dem ToFD-Verfahren auf. Dass das sehr niedrigviskose PU während des initialen Biegebeanspruchung relativ schnell aus den Kapillaren ausdrang, zeigt Abbildung 6-18. Daher ist zu vermuten, dass der Effekt der flächendeckenden Rissverfüllung bei der anschließenden US-Prüfung bereits mitgemessen wurde. Es ist anzunehmen, dass das noch flüssige PU als akustische Brücke fungiert und der Riss überbrückt wird. Da die Ersteinsatzbestimmung mit einem gleichmäßig hohem S/N-Verhältnis einherging, konnte eine zuverlässige Ersteinsatzbestimmung erfolgen. Das spiegeln auch die nur sehr kleinen Risstiefenredundanzen je Messpunkt innerhalb des tomographischen Ansatzes wieder. Da die Bestimmung des Ersteinsatzes maßgeblich von der Steilheit der P-Wellenfront sowie des S/N-Verhältnisses abhängig war, hätte eine Erhöhung der Abtastrate nicht zwangsweise zu einer genaueren Risstiefendetektion geführt. Mit Hilfe eines Monitorings einer manuellen Rissverfüllung mit „SLV“ (Kapitel 6.2.3) ließ sich nachweisen, dass die US-Schalllaufzeit direkt mit der Einbringung abnimmt.

Die relativ konstant über den Querschnitt gemessene Risstiefe von circa 0,02 m, sowohl nach dem Bruch als auch nach der Heilung, könnte somit auf die veränderte Materialzusammensetzung (Beton  $\rightarrow$  PU  $\rightarrow$  Beton) zurückgeführt werden. Die Ergebnisse aus Kapitel 6.1.2 sowie eine ähnlich Studie von Tsangouri et al. (2015) mit gleichem Heilmittel würden dies bestätigen.

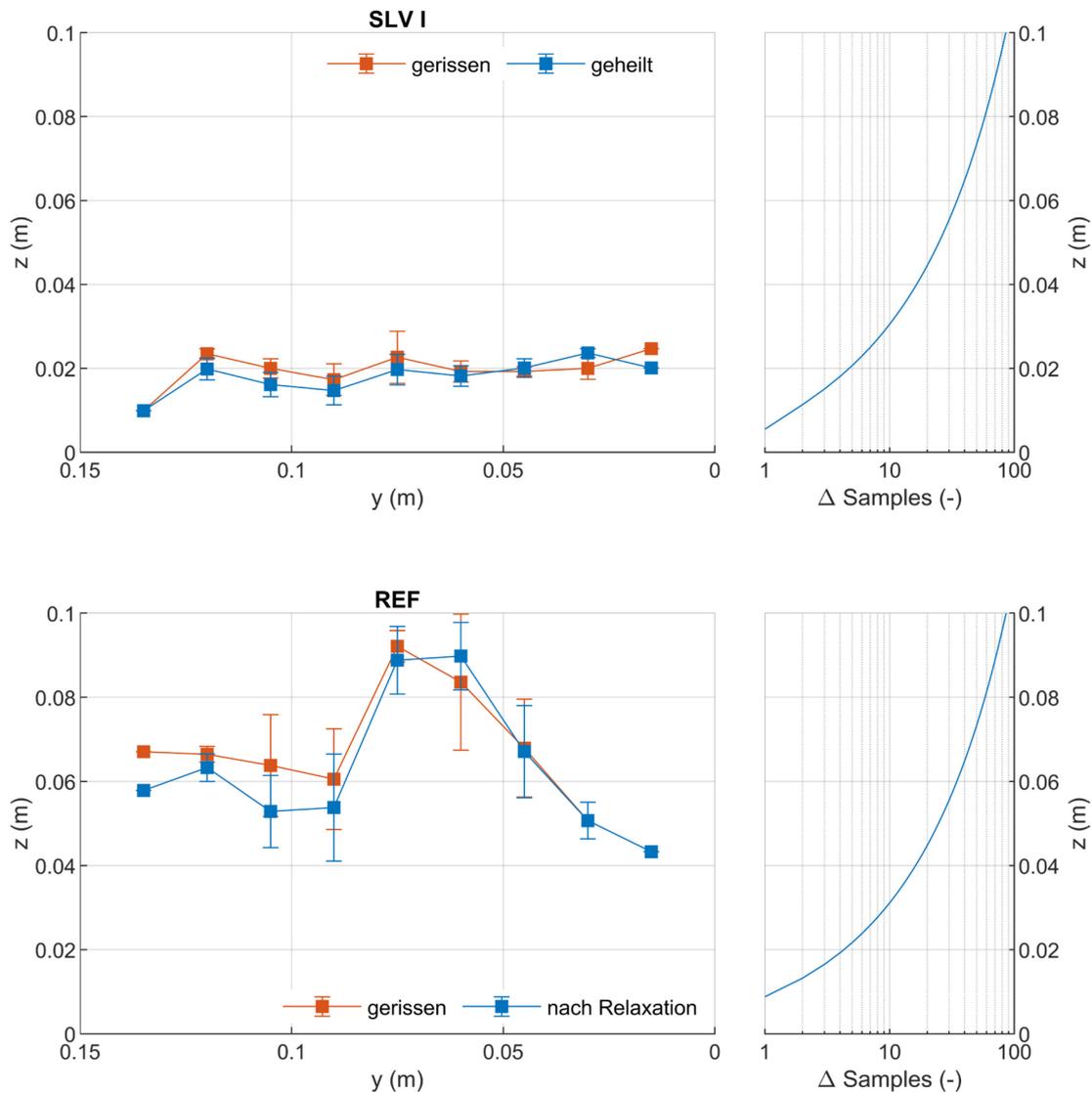


Abbildung 6-22: Oben: Risstiefenbestimmung von Testkörper „SLV I“ mit TofD-Verfahren (tomografischer Ansatz) nach Rissinitiiierung und nach dreitägiger Heilung. Unten: Risstiefenbestimmung von Referenz-Testkörper „REF“ ohne Selbstheilungseigenschaften mit TofD-Verfahren (tomografischer Ansatz) nach Rissinitiiierung und nach 24 h Relaxation. Zur besseren Übersicht sind die jeweils 9 Messpunkte je Querschnitt miteinander verbunden dargestellt. Rechts: Zusammenhang zwischen Sampleddifferenz der P-Wellenersteinsätze (nach Bruch/nach Heilung bzw. Relaxation) und berechneter Risstiefe nach Gl. 4-5.

### 6.2.3 Ultraschall: In situ

Die Überwachung des Verfüll- und Aushärtprozesses des Polyurethans „SLV“ erfolgte mit dem selben Messaufbau wie in Kapitel 6.1.3 beschrieben, wobei als Signalgeber- und Empfänger Scherwellensensoren des Typs Olympus Panametrics V153-RB Sensoren zum Einsatz kamen. Zusätzlich galt es nach Abschluss der dreitägigen Aushärtung die Auswirkungen des Wiederbelastungsprozesses auf das kraftschlüssige Verbundverhalten der Rissflanken zu charakterisieren. Um Beeinflussungen durch An- und Abkopplung der Sensoren zu umgehen, blieben diese auch zwischen den Prüfphasen konstant angebracht. Die zeitliche Differenz zwischen der Rissinitiierung und dem Start der ersten In-situ-Messung betrug 20 Minuten („SLV IV“) bzw. 70 Minuten („SLV II“). Die anschließende Lagerung erfolgte in einer Klimakammer (20°C, 65 % rel. LF). In Kapitel 5.2.3 konnte bereits gezeigt werden, dass mit konstanten Temperatur- und Feuchtebedingungen optimale Bedingungen für diese Messdurchführung vorliegen. Die Versuchs- und Messparameter finden sich in Tabelle 0-14 (Appendix C).

Ausgehend vom Endzeitpunkt der Heilungsphase (Wert=1) ist in Abbildung 6-23 das Verhalten des Korrelationskoeffizienten für die Testkörper „SLV II/IV“ über eine Heilungsphase von ca. 66 h sowie über die volle Wiederbelastungsdauer gegeben. Der zeitliche Versatz zwischen Rissinitiierung und Beginn der In-situ-Messung beträgt jeweils ca. 3 bis 4 h. Dieser Zeitspanne bleibt in Abbildung 6-23 unberücksichtigt. Parallel ist die Wiederbelastungskurve des Referenztestkörpers („REF“) mit leeren Glaskapillaren gezeigt. Auch wenn zwischen der Heilungsphase und der Wiederbelastung der Versuchsaufbau neu aufgebaut werden musste, wurden die Messdaten über beide Phasen zusammengefasst und als Einheit ausgewertet.

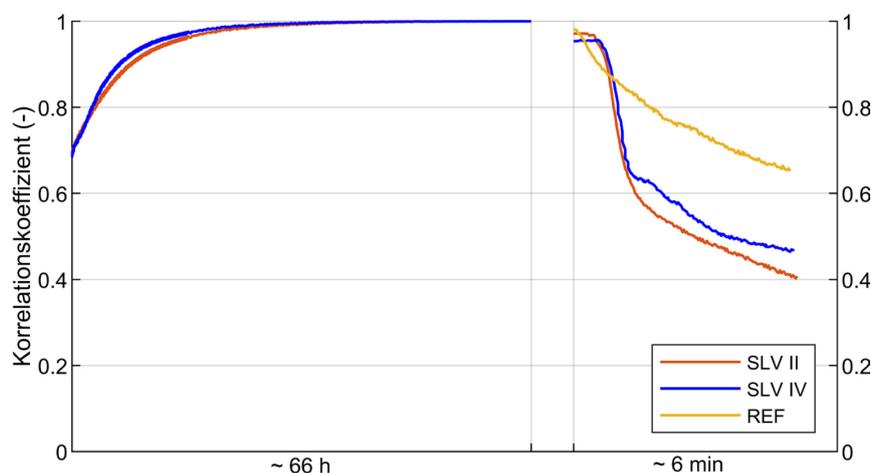


Abbildung 6-23: In-situ-Beobachtung der Aushärtung sowie der anschließenden Wiederbelastung mit Ultraschall. Im Vergleich ein gerissener Referenztestkörper ohne Verfüllung während der Wiederbelastung.

Das Kurvenverhalten von „SLV II/IV“ ist während der Heilungsphase sehr gleichförmig und unterscheidet sich auch in der Koeffizientendifferenz mit 0,3098 bzw. 0,3152 vernachlässigbar gering. Der steilste Kurvenanstieg ist innerhalb der ersten 6,5 h zu verzeichnen und nimmt anschließend konstant ab. Nach 26 h Aufzeichnungslänge sind kaum noch Veränderungen wahrnehmbar und der Korrelationskoeffizient liegt bereits bei 0,99. Ein vergleichbares Ergebnis konnte innerhalb der „SLV“-

Mörteltestserie (Kapitel 5.2.3) ebenfalls über den Korrelationskoeffizienten sowie über die Centroid Frequency erzielt werden.

Zu Beginn der Wiederbelastungsphase betragen die Koeffizienten 0,98 („SLV II“) bzw. 0,96 („SLV IV“). Diese Abweichung lässt mit der Neueinrichtung des Versuchsaufbaus an der Biegeprüfmaschine begründen. Ebenfalls kann der Transport der Testkörper eine veränderte Signalausbreitung im Testkörper hervorgerufen haben. Der kraftschlüssige Verbund von „SLV II/IV“ lässt sich sehr gut mit der In-situ-Messung nachvollziehen. Während der „REF“-Testkörper ein gleichmäßiges und zur rissweitengesteuerten Beanspruchung fast korrelierendes Kurvenverhalten aufweist, lässt sich das Auflösen des Verbundverhaltens, ähnlich zur Kraftkurve (Abbildung 6-20), in drei Abschnitte einteilen. Innerhalb der ersten Sekunden erfolgte ein Kraftanstieg bis zur maximalen Kraftaufnahme des PU-basierten Rissverbundes. Bis dahin war mit einem weitestgehend vollständigen kraftschlüssigen Verbund und folglich mit keiner veränderten Schallausbreitung zu rechnen. Mit Erreichen der Maximallast fällt der Korrelationskoeffizient steil ab. Hat die PU-Matrix ihr vollständiges kraftschlüssiges Verbundverhalten verloren ( $t \approx 2$  min), flacht der Kurvenverlauf ab und wird nur noch durch die zunehmende Rissweite beeinflusst.

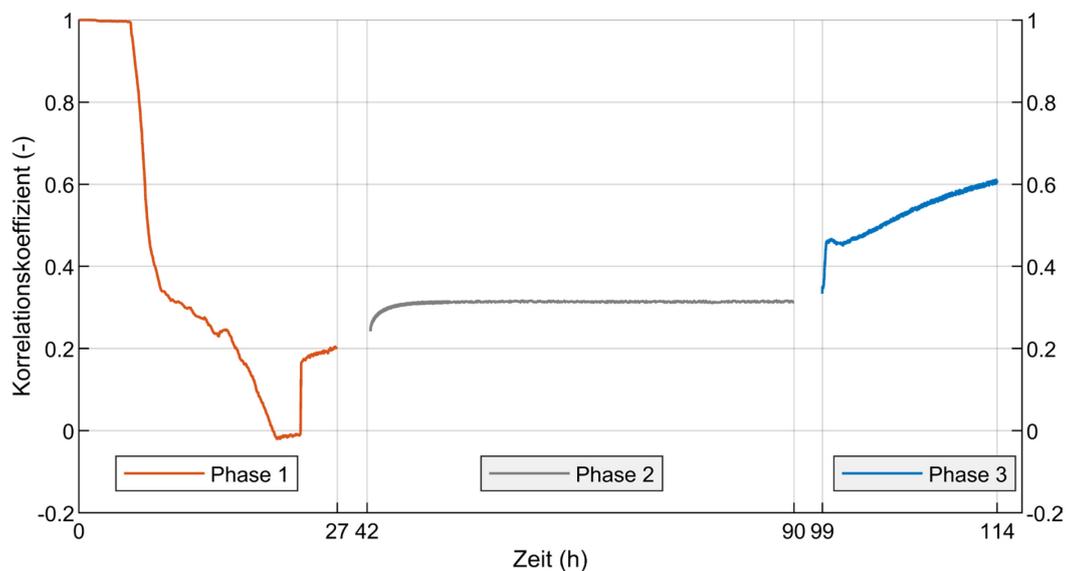


Abbildung 6-24: Vollständige In-situ-Überwachung eines Betontestkörpers mit anschließender manueller Verfüllung des Risses mit „SLV“. Phase 1: Initialer 3-P-Biegeversuch mit anschließender Entlastung. Phase 2: Relaxation. Phase 3: Manuelle Verfüllung mit „SLV“ und Aushärtung.

Um einen Zusammenhang über alle Belastungsphasen sowie den Einfluss möglicher Relaxationsprozesse quantitativ zu erfassen, wurde ein zusätzlicher Betontestbalken ohne Kapillaren manuell mit „SLV“ verfüllt. Die Sensoren blieben über den vollständigen Versuchsablauf von 114 h konstant angekoppelt. Lediglich der Messaufbau musste zwischen den einzelnen Phasen auf- und abgebaut werden. In Abbildung 6-24 ist der Korrelationskoeffizient über drei einzelne Phasen gekoppelt wiedergegeben. Dabei charakterisiert „Phase 1“ den Schädigungsprozess während des 3-P-Biegeversuchs sowie die anschließende Entlastung, „Phase 2“ den Relaxationsvorgang, hauptsächlich beeinflusst durch den elastischen Anteil der Bewehrung und „Phase 3“ den Verfüll- und Aushärtungsprozess über 15 h (Stunde 99-115). Ausgehend vom ungeschädigten Zustand (Wert=1) gibt

der Korrelationskoeffizientenverlauf ein konsistentes und zuverlässiges Bild für eine messbare Rissverschließung wieder. Der leichte Kurvenanstieg innerhalb der ersten Stunden von Phase 2 ist vermutlich auf Relaxationsprozesse infolge eines Transportes und Umlagerung des Balkens zurückzuführen und nicht auf die Folge der Biegebeanspruchung. Deutlichster Unterschied zu Abbildung 6-23 ist die Erfassung des Kurvenverhaltens mit Beginn der Rissverfüllung. Der nahezu senkrechte Anstieg erfolgt innerhalb der ersten 0,5 h und kann folglich während des regulären Versuchablaufs (Abbildung 6-1) über eingebrachte Glaskapillaren nicht in Abbildung 6-23 abgebildet werden. Auch wenn der Messaufbau nicht dem des ToFD-Verfahrens entspricht konnte ebenfalls mit Beginn der Verfüllung ein sofortiger Abfall des Ersteinsatzes der propagierenden US-Welle detektiert werden. Dieses Verhalten erklärt, warum mittels ToFD-Verfahren in Kapitel 6.2.2 keine entsprechende Ristiefen im gerissenen Zustand ermittelt werden konnten. Nach bereits 0,5 h nimmt der Anstieg beider Auswerteparameter rapide ab und die Werte passen sich zunehmende der initialen Ausgangslage an.

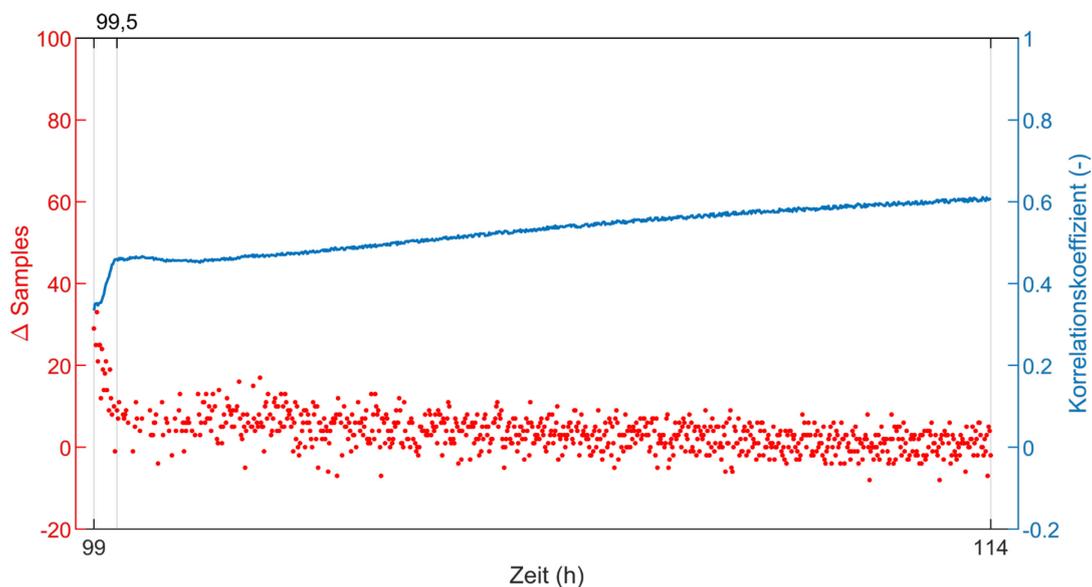


Abbildung 6-25: Detaillierte Darstellung von „Phase 3“ aus Abbildung 6-24. Parallel zum Korrelationskoeffizient sind die Sample-Differenzen vom Ersteinsatz des ungeschädigten Betonbalkens ( $t=0$  in „Phase 1“) aufgeführt. Die Ersteinsatzbestimmung erfolgte automatisiert mittels AIC-Picker. Fehlerhafte Ersteinsätze wurden manuell herausgefiltert.

#### 6.2.4 Schwingungsanalyse

Die Resonanzfrequenzanalyse erfolgte für die „SLV“-Betontestkörper über die flexurale und torsionale Grundschwingung, angeregt mittels Impakthammer des Typs 8204 (Bruel & Kjaer) sowie aufgezeichnet mit dem uniaxialen Beschleunigungssensor Model 352C33 (PCB Piezotronics). Da für die In-situ-Messung der Ultraschallprüfung (Kapitel 6.2.3) die Kontaktsensoren an den Balkenausflächen der Testkörper „SLV II/IV“ und „REF“ über die volle Versuchsdauer der Zustände angekoppelt blieben, war eine zentrische und gleichmäßige Impaktanregung nicht möglich. Daher ist auf eine longitudinale Resonanzfrequenzbestimmung verzichtet worden. Das zusätzliche Gewicht der Sensoren für die In-situ-Messung hat sich dabei nicht auf die Frequenzanregungen ausgewirkt.

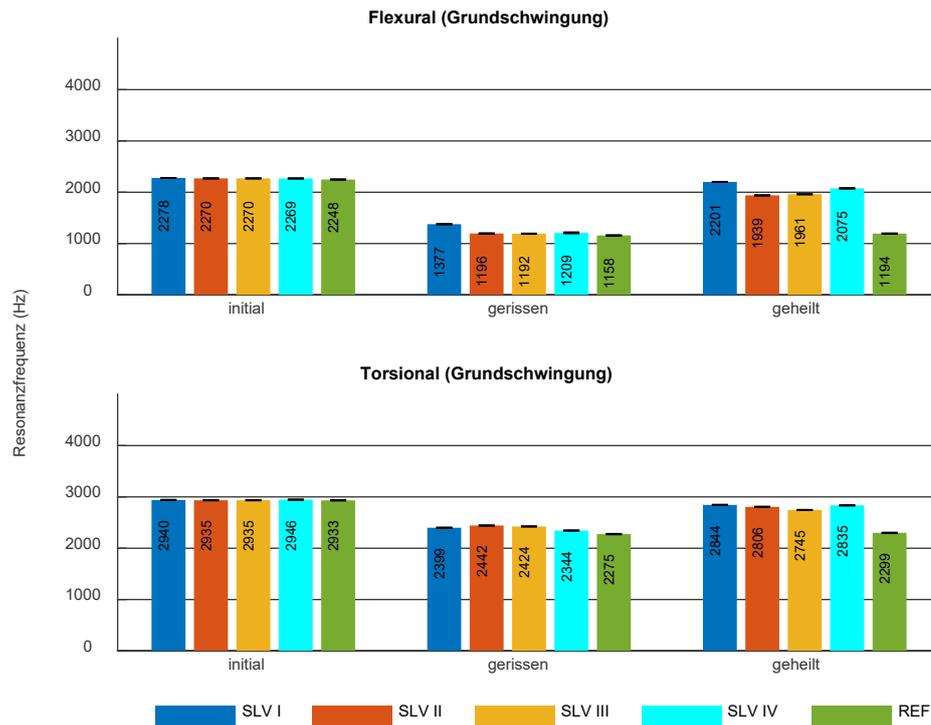


Abbildung 6-26: Flexurale und torsionale Resonanzfrequenzen in der Grundschiwingung der „SLV“-Betontestkörper zu den unterschiedlichen Zuständen (initial, gerissen, geheilt). Mittelwert und Standardabweichung wurden aus jeweils drei Einzelmessungen gebildet.

Die Ergebnisse der flexuralen und torsionalen Grundschiwingungen sowie die daraus berechnete Selbstheilungseffizienz (SHE) nach Gl. 6-1 sind in Abbildung 6-26 und Tabelle 6-8 gegeben. Die Resonanzfrequenzen des initialen Zustandes suggerieren mit einer Standardabweichung von 11 Hz (flexural) bzw. 5 Hz (torsional) über alle Testkörper eine sehr homogene Testkörperherstellung. Mit der Rissinitiierung nimmt die Abweichung stark zu (flexural: 86 Hz, torsional: 68 Hz), wobei im Vergleich zur „MEYCO“-Testserie eine sehr gleichmäßige Schädigung mit dicht beieinanderliegenden Frequenzen erzielt wird. Nach drei Tagen Lagerung in der Klimakammer und einer erfolgreichen kraftschlüssigen Rissverschließung steigen die Resonanzfrequenzen für beide Anregungsarten wieder an. Wird das Verhältnis der benetzten Fläche mit „SLV“ der einzelnen Testkörper in Bezug zur anregungsabhängigen Selbstheilungseffizienz (SHE) gesetzt, weist die torsionale Grundschiwingung (grün) ein korrelierendes Verhalten über die vollständige Testserie auf. Die SHE kommt einem korrelierenden Verhalten mit der flexuralen Grundschiwingung allerdings sehr nah. Dieses Resultat zeigte sich ebenfalls in der „MEYCO“-Testserie.

Tabelle 6-8: Bestimmung der Selbstheilungseffizienz (SHE) für „SLV“-Betontestkörper nach Gl. 6-1 für alle drei Grundschwingungsmoden (flexural, longitudinal, torsional) sowie der Prozentsatz an benetzter Fläche mit PU nach der Heilung.

	SHE (%)		Benetzte Fläche (%)
	flexural <sub>Grund</sub>	torsional <sub>Grund</sub>	
<b>SLV I</b>	91	82	69
<b>SLV II</b>	69	74	60
<b>SLV III</b>	71	63	57
<b>SLV IV</b>	82	82	62
<b>REF</b>	3	4	0

### 6.2.5 Schallemissionsanalyse

Der Versuchsaufbau der Schallemissionsanalyse der „SLV“-Testserie entspricht weitestgehend dem der „MEYCO“-Testserie aus Kapitel 6.1.5. Die System- und Messeinstellungen der Datenaufzeichnungssoftware sowie der weiteren Messkettenkomponenten sind für alle „SLV“-Betontestkörper identisch (Tabelle 0-15, Appendix D) und wurden unter Berücksichtigung künstlich erzeugter Schallemissionen nach Hsu (1977) gewählt. Aufgrund der reduzierten Anzahl von 14 SE-Sensoren ergaben sich für das Bancroft-Verfahren 1001 Permutationskombinationen. Die Eventselektierung erfolgt weiterhin mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,5 für das Bancroft-Verfahren sowie 0,8 für den Geigeralgorithmus. Da die Ergebnisse des Geiger-Verfahrens keinen Mehrwert lieferten, werden nur die Lokalisierungsergebnisse nach Bancroft (1985) aufgezeigt. Die aus einer Rastermessung mit 420 oberflächlichen US-Impulsen bestimmte Schallausbreitungsgeschwindigkeit beträgt 4720 m/s ( $\pm 104$  m/s). Die Sensorpositionen während des „initialen“ („REF“-Testkörper) bzw. „wiederbelasteten“ Zustands sind in Tabelle 0-16 und Tabelle 0-17 (Appendix D) gegeben.

Die Triggerung einer Aktivierung der Selbstheilung wurde über eine energiebasierte Selektierung der SE-Events des Referenztestkörpers („REF“) mit anschließender Lokalisierung validiert. Abbildung 6-27 zeigt die zeitabhängige SE-Aktivität aller lokalisierbaren Events sowie die Kraftkurve während der initialen Biegebeanspruchung. Die selektierten SE-Events mit einer relativ hohen Signalenergie können über die Lokalisierungsdarstellung in y-z- und x-y-Ebene (Abbildung 6-27) den Positionen der eingebetteten Glaskapillaren zugeordnet werden. Unter Berücksichtigung der maximalen Mislokalisierungsvektoren je Koordinatenrichtung (dargestellt als Ellipse) ist eine eindeutige Zuordnung bzw. Differenzierung zwischen den dicht beieinander platzierten Kapillarenpaaren nicht möglich. Allerdings deuten die aus der Punktwolke berechneten Herdkoordinaten auf eine Aktivierung aller acht eingebrachten Glaskapillaren während des initialen 3P-Biegeversuchs hin. Auffällig dabei ist, dass die energiestarken Schallemissionen, welche immer auf die Positionen der Kapillaren hindeuten, über die vollständige Versuchsdauer versetzt auftraten. Dieses Verhalten war innerhalb der MEYCO-Testserie (vgl. Abbildung 6-13) nicht erkennbar. Zudem kommt, dass auch mehrere Events auf eine Kapillarposition registriert werden. Ob es sich dabei um verspätete initiale Kapillarbrüche oder um

nachträgliche Frakturen an den Bruchkanten handelt, lässt sich über eine Betrachtung der zeitlichen SE-Aktivität aufklären. Eine Lokalisierung der energiereichen Events bis  $t=3$  min zeigt, dass bis zu diesem Zeitpunkt bereits eine vollständige Aktivierung aller eingebrachten Glaskapillaren erfolgt ist (Abbildung 6-28). Diese Erkenntnis ist für die Untersuchung gleichgerichteter Studien sehr essentiell. In zahlreichen Veröffentlichungen werden meist keine Lokalisierungsansätze verfolgt und ausschließlich parameterbasierte Auswertungstechniken angewandt. Ohne eine Lokalisierung ist daher das Zählen von Events und die Sortierung nach spezifischen Charakteristiken für eine aussagekräftige Betrachtung hinsichtlich der Aktivierung von Glaskapillaren nur bedingt aussagekräftig. Die Wahrscheinlichkeit einer Fehlinterpretation wird, besonders bei unsystematischen Kapillaranordnungen, erhöht.

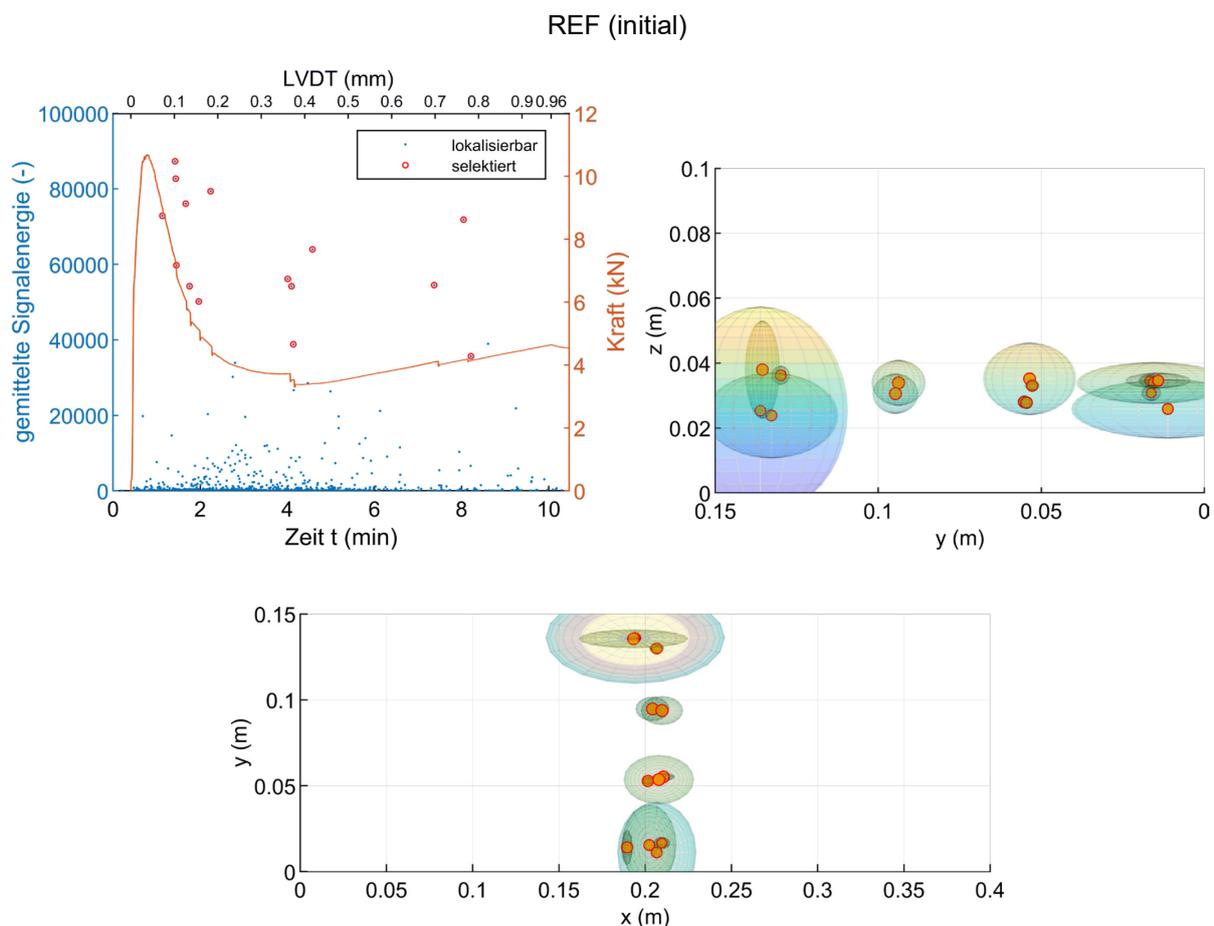


Abbildung 6-27: Links: Zeitabhängige SE-Aktivität sowie des Kraftkurvenverhaltes während des initialen rissweitengesteuerten 3-P-Biegeversuchs von Referenztestkörper „REF“ der „SLV“-Testserie (links oben). Die Selektierung der SE-Events über die gemittelte Signalenergie (rot markiert) führt zu einer Lokalisierung (Bancroft-Verfahren) der eingebetteten Glaskapillaren im mittigen Testkörperbereich (rechts oben und unten). Die Ellipse um den Quellherd bildet sich aus dem maximalen Mislokalisationsvektor je Koordinatenachse (Kapitel 4.2.1).

Die Ergebnisse der SEA aus der Wiederbelastung der Testkörper „SLV I-IV“ sowie des Referenztestkörpers „REF“ sind in Abbildung 6-29 dargestellt. Jeweils auf der linken Seite ist die zeitabhängige SE-Aktivität in Abhängigkeit der Signalenergie sowie die korrelierende Kraftkurve aufgetragen. Parallel dazu, auf der rechten Seite, die Lokalisierungsergebnisse (Bancroft-Verfahren) in der y-z- bzw. x-z-Ebene der selektierten SE-Events. Aufgrund des reduzierten Belastungsszenarios bis

maximal 0,5 mm Rissweite konnte eine weiterführende Schädigung im oberen Rissspitzenbereich der Beton-Zementmatrix ausgeschlossen werden. Dennoch waren Events aus den Auflagerbedingungen entstanden, wie bei „SLV I“ ( $z \geq 0,08$  m) ersichtlich. Generell ist festzustellen, dass, verglichen mit der „MEYCO“-Testserie, die Schädigung der „SLV“-Matrix mit einer geringeren Anzahl an detektierten Events einhergeht. Während für den Testkörper „SLV I“ noch eine hohe SE-Aktivität vorhanden ist, welche sich zugleich stark vom „REF“-Testkörper unterscheidet, weisen „SLV II-IV“ trotz flächendeckender PU-Benetzung und kraftschlüssigem Verbund nur sehr wenige lokalisierbare Events auf. Eine Korrelation zur benetzten PU-Fläche (Abbildung 6-30) ist im Gegensatz zur „MEYCO“-Testserie (Kap. 6.1.5) nicht vorhanden.

Unter Einbeziehung aller lokalisierbarer Events (blaue Punkte) lässt sich innerhalb des anfänglichen Kraftkurvenbereichs jedoch teilweise eine vermehrte Ansammlung von Events erkennen. Wie in Feiteira et al. (2016) gezeigt, kam es bei einer Überbelastung des Rissverbundes mit HA FLEX SLV zu einem Ablösen von der Betonmatrix und nicht zu einer spontanen Instabilität der PU-Matrix. Dieses relativ langsame Ablösen kann folglich zu sehr „leisen“ (energiearmen) und tieffrequenten Emissionen führen, welche von der Triggerschwelle nicht registriert werden.

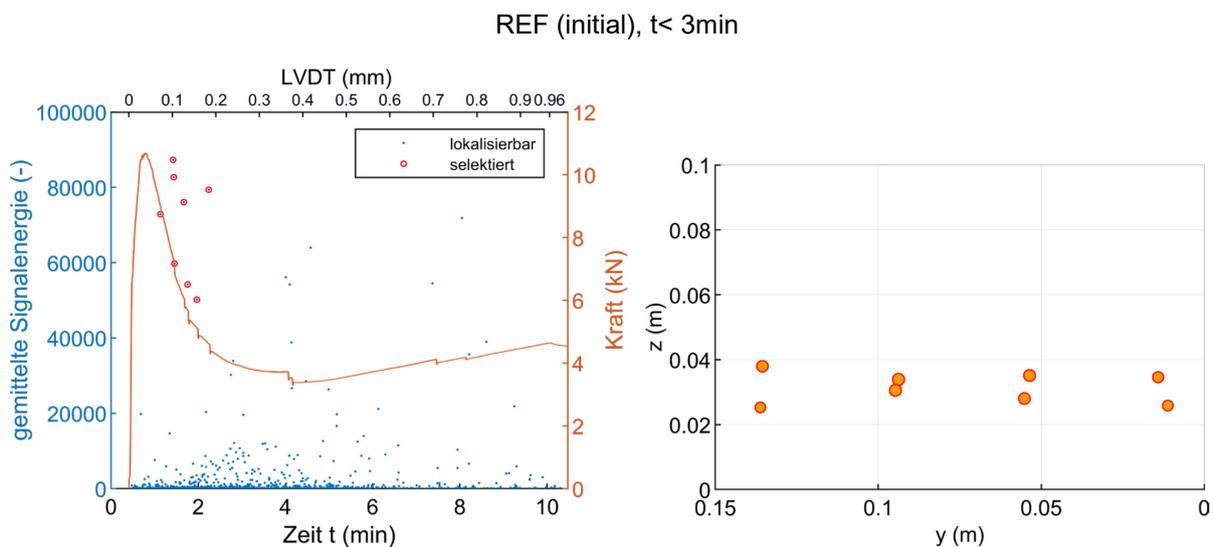
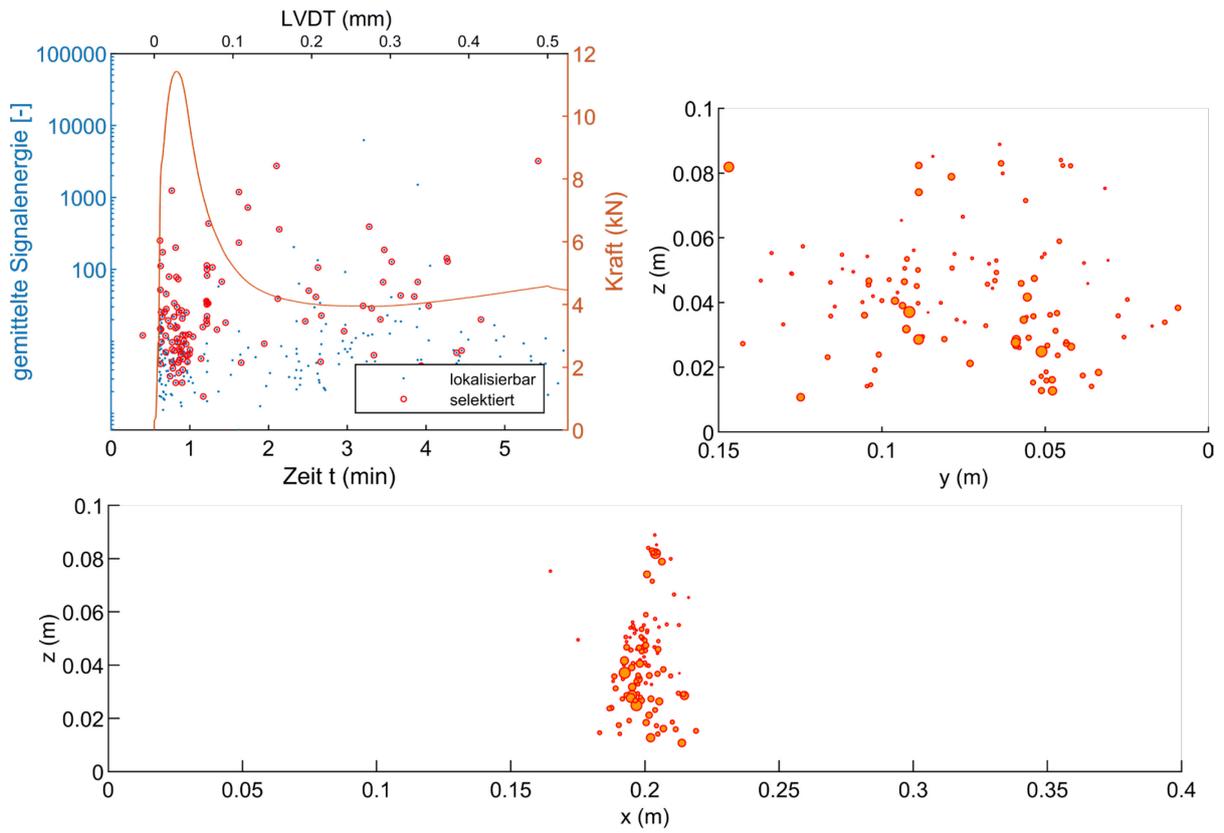
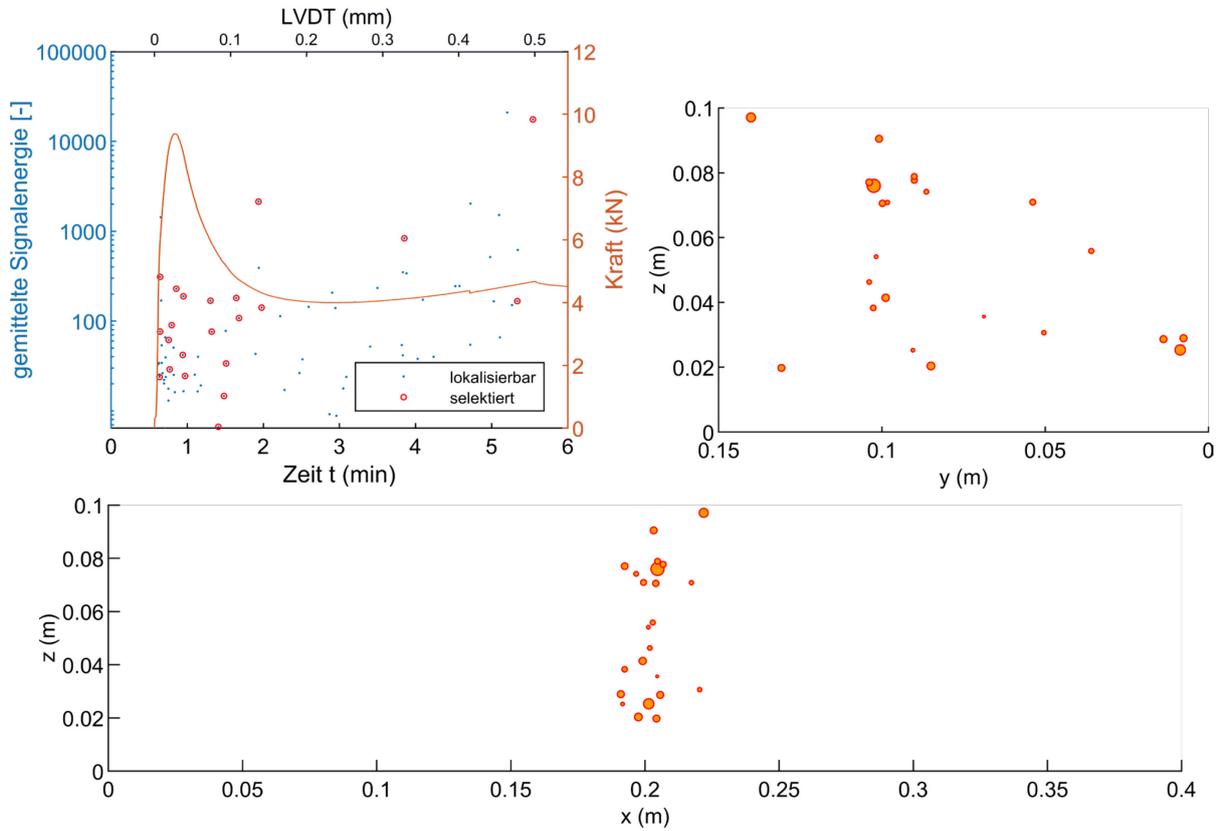


Abbildung 6-28: Links: Zeitabhängige SE-Aktivität sowie das Kraftkurvenverhalten während des initialen rissweitengesteuerten 3-P-Biegeversuchs von Referenztestkörper „REF“. Eine Selektierung der Events bis  $t=3$  min mit anschließender Lokalisierung (rechts) deutet bereits auf eine vollständige Aktivierung aller eingebrachten Glaskapillaren.

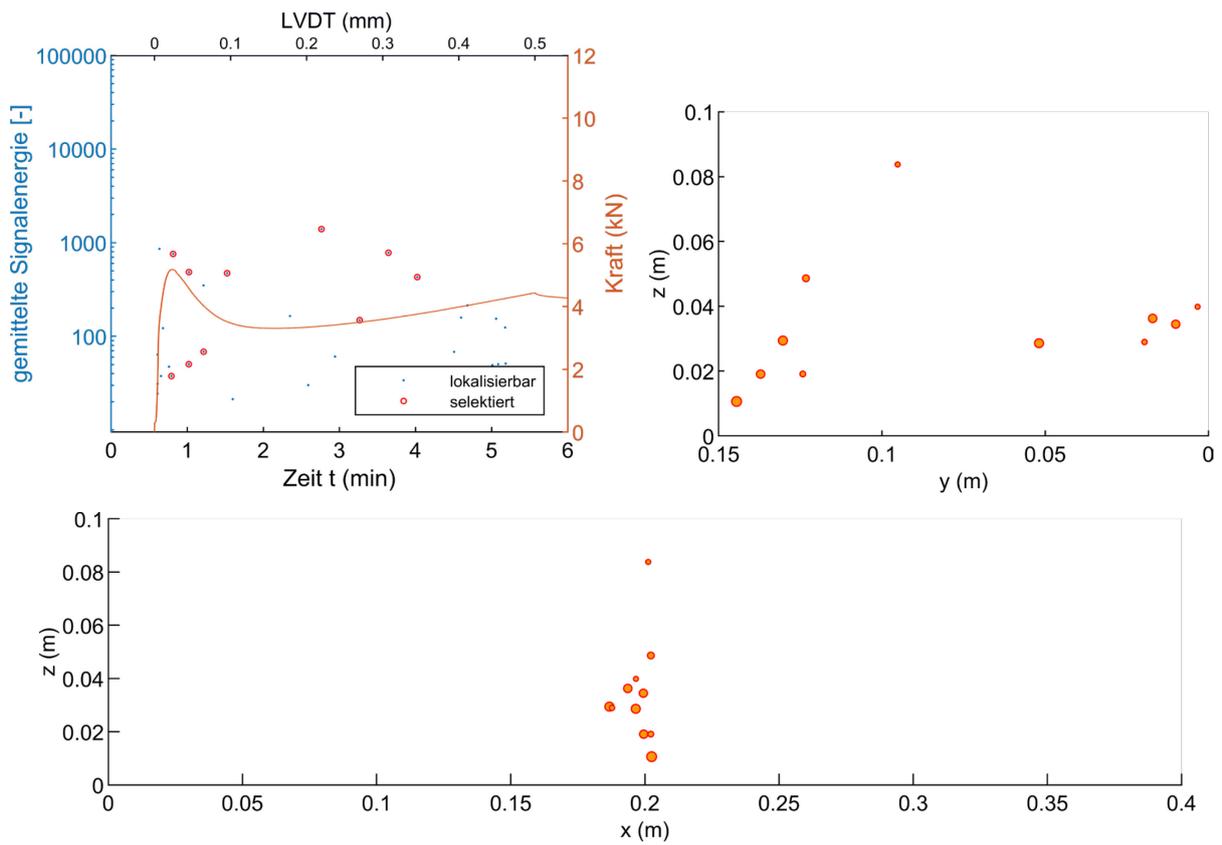
SLV I (wiederbelastet)



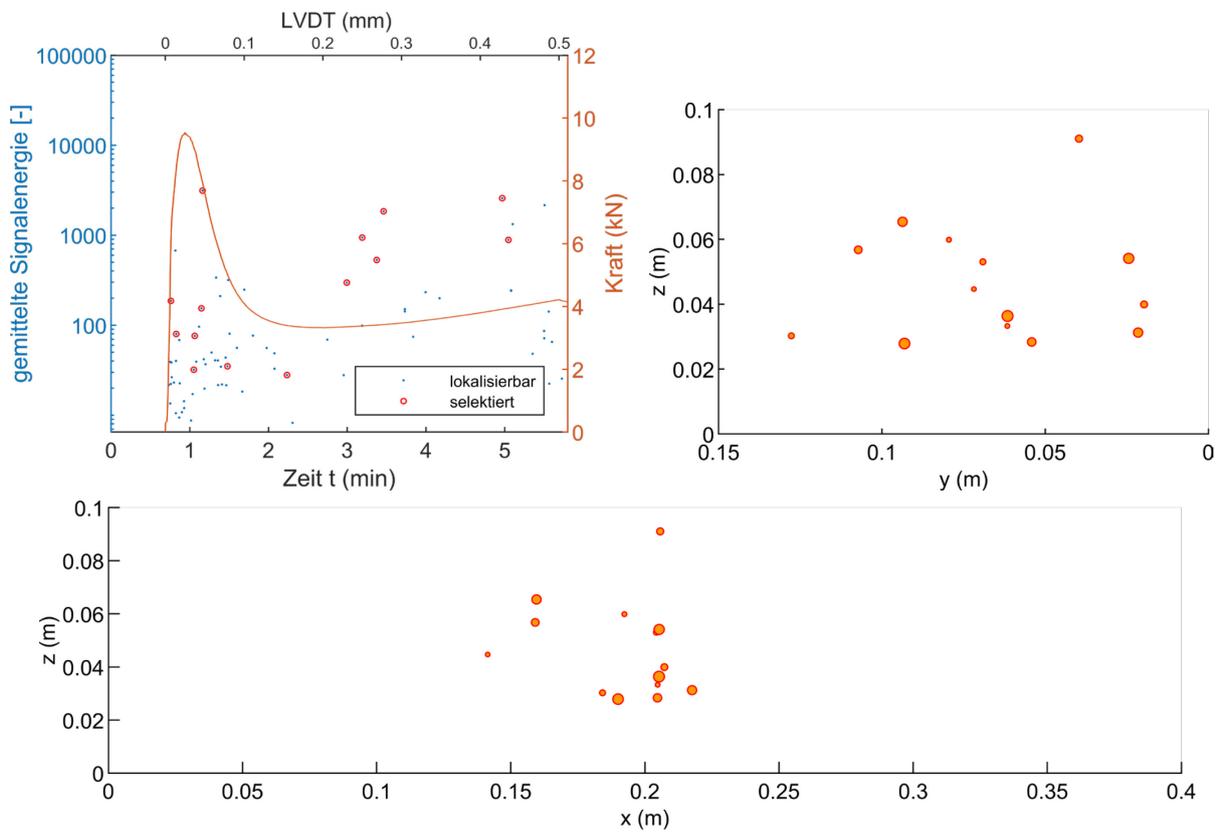
SLV II (wiederbelastet)



SLV II (wiederbelastet)



SLV III (wiederbelastet)



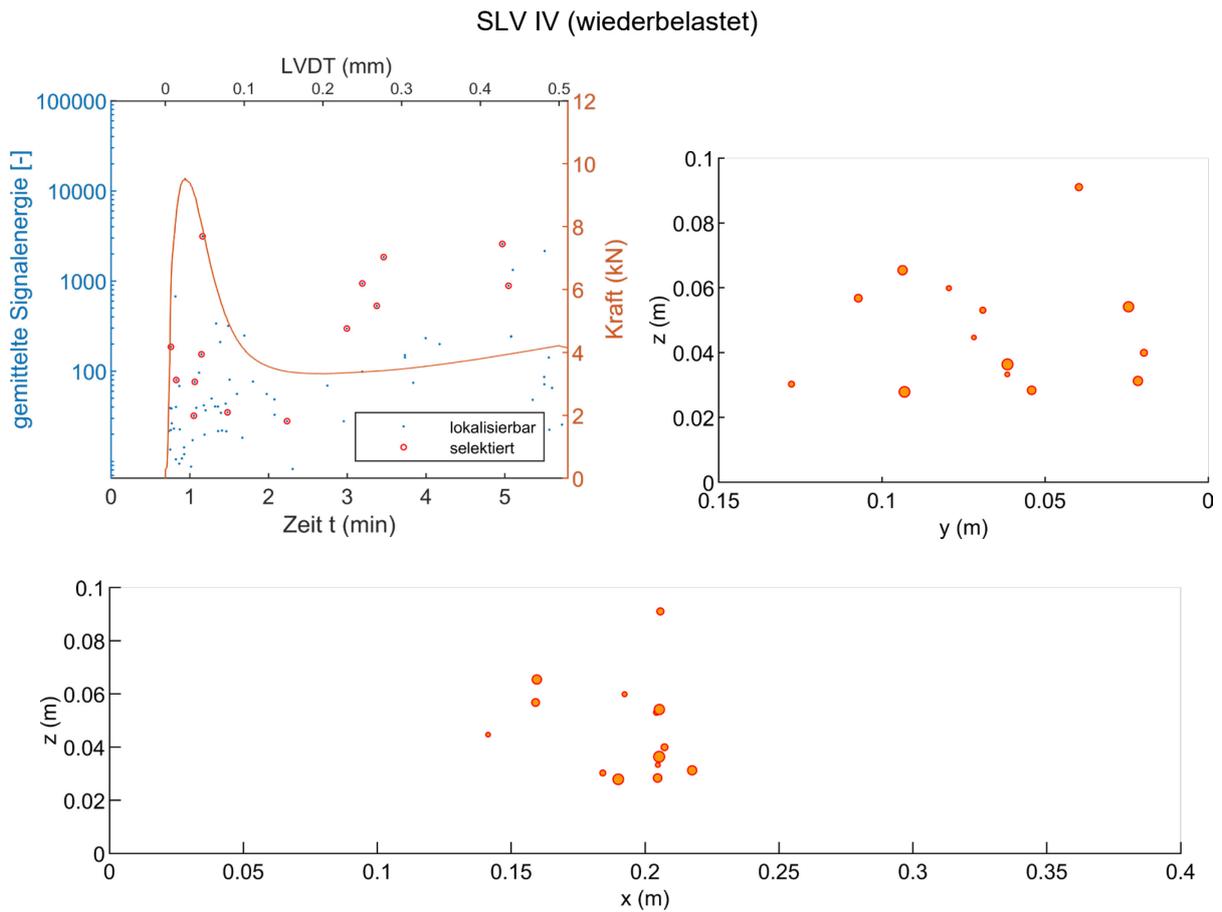


Abbildung 6-29: Ergebnisse der SEA während der Wiederbelastung innerhalb der „SLV“-Betontestkörperserie. Jeweils links oben: Zeitabhängige SE-Aktivität sowie das Kraftkurvenverhalten des rissweitengesteuerten 3-P-Biegeversuchs. Jeweils rechts oben und unten: Lokalisierung der selektierten SE-Events über die gemittelte Signalenergie (rot markiert) führt zu einer Lokalisierung (Bancroft-Verfahren) der eingebetteten Glaskapillaren im mittigen Testkörperbereich.

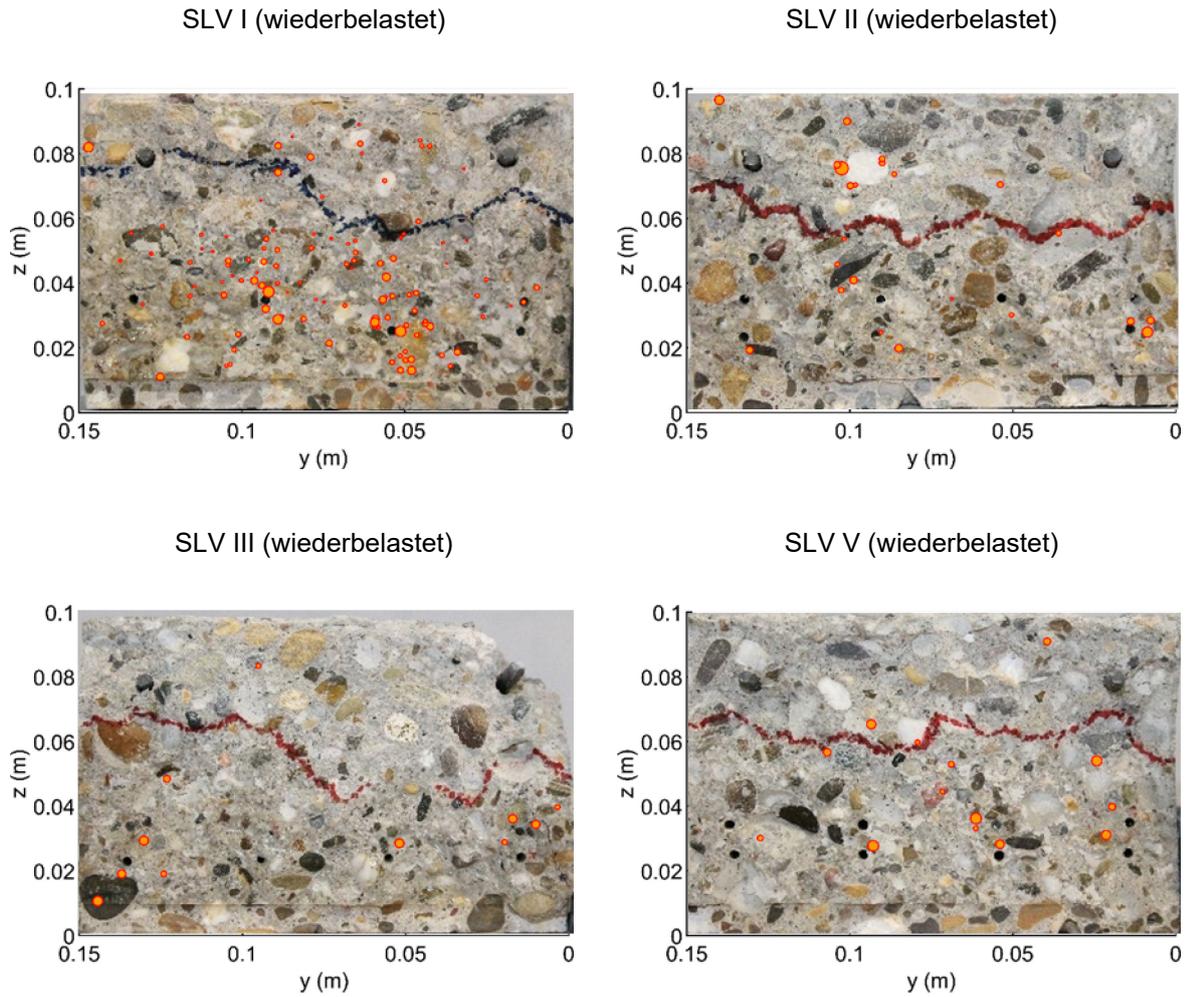


Abbildung 6-30: Lokalisierungsdarstellung der selektierten SE-Events der einzelnen „SLV“-Testkörper aus der vorherigen Abbildung 6-19 mit dem Bancroft-Verfahren in der  $y$ - $z$ -Ebene. Die Größe der Kreise steht in einem logarithmischen Bezug zur gemittelten Energie über alle relevanten Sensoren je SE-Event. Im Gegensatz zur „MEYCO“-Testserie lässt die im Hintergrund befindliche Querschnitts-Rissfläche keinen Vergleich mit der autonomen Verfüllung des PUs durch die Glaskapillaren zu.



## 7 Makro-Ebene: Bauteile

Die Entwicklung und Untersuchung von neuartigen Produkten für die Herstellung von selbstheilenden bzw. selbstabdichtenden zementgebundenen Werkstoffen hat in Kapitel 5 und 6 verdeutlicht, dass deren Qualität bzw. Effizienz nur so gut ist, wie auch deren Bewertungsmethoden. Die unterschiedlichen Wirkungsweisen der verwendeten Heilmittel sowie deren Verträglichkeit mit dem Werkstoff Zement und zusätzlicher Zuschläge bzw. Additive erfordern spezifisch angepasste Evaluierungsmethoden. Neben der chemischen Zusammensetzung der Zusatzstoffe können auch kleinste Mengenunterschiede stark variierende Eigenschaften hervorrufen. Im Labormaßstab lassen sich häufig zielgerichtete Prüfsysteme entwickeln, welche die individuellen Fähigkeiten der neuartigen Materialien analysieren. Systembeeinflussende Szenarien, wie z. B. veränderte Materialkompositionen oder variierende Lagerbedingungen, können bis zu einem gewissen Grad integriert werden. Diese Vorgehensweisen sind zwar hilfreich und auch notwendig, können aber aktuell, ebenso wie die numerische Simulation, nur begrenzt Hinweise auf mögliche Auswirkungen in der industriellen Anwendung geben.

In diesem Abschnitt werden zwei unterschiedliche Betonbauteile in Makro-Ebene analysiert, die jeweils ein typisches Bauelement in der Industrie darstellen und aufgrund dessen Versagensmechanismus als geeignetes Objekt für eine Anwendung von selbstheilendem Beton dienen. Fertigteilstützen oder Durchlaufträger im Hochbau entsprechen meist klassischen Biegebalken, welche im gerissenen Zustand nicht durchgängige Biegerisse aufweisen. Vorgefertigte Betonsegmente hingegen stellen z. B. die tragende Konstruktion im maschinellen Tunnelbau dar. Diese plattenähnlichen Schalenelemente (Tübbing) müssen als 1-schalige Konstruktion eine dauerhafte Trag- und Dichtigkeitsfunktion übernehmen. Um ein Versagen solcher Beanspruchungen zu simulieren, wurden Betonplatten mit vorwiegend durchgehenden Rissen angefertigt.

Herausforderung bei der Konzeptionierung der Testkörper war es, den schematischen Entwurf (Form, Dimensionierung, Bewehrung) möglichst den praktikablen Anforderungen anzupassen, bei gleichzeitiger Optimierung für eine kontrollierte Rissinitiierung. Darüber hinaus musste der Versuchsaufbau kompatibel mit einer künstlich herbeigeführten Heilungsphase sein, ebenso bedurfte es eines möglichst adaptiven Konzeptes für eine Beurteilung der Selbstheilungseffizienz. Dazu zählten neben den zerstörungsfreien Prüfungen auch klassische Permeabilitätstests. Aufgrund der eingeschränkten Transportfähigkeit (z. B. eingeschränkter Zugang zur Rissstruktur) und den Lagerungskonditionen (z. B. zyklische Wasserexposition, Trocknungsphase) der Testkörper musste ein

Kompromiss aus Mobilität des Messsystems, Messdauer und Messsystemstabilität/Sensitivität sowie Reproduzierbarkeit gefunden werden.

Als Heilmittel wurden ausschließlich bakterienbasierte Konzepte sowie Hydrogele für eine autonome und verstärkt autogene Rissversiegelung eingesetzt. Die Sicherstellung der Rissverschließung bzw.- Abdichtung erfolgte dabei über Calciumcarbonat, welches bislang nicht für eine Rückgewinnung mechanischer Eigenschaften ausgelegt ist (Kapitel 2.2/2.3). Mit diesen Voraussetzungen lassen sich bereits zerstörungsfreie Prüfverfahren wie z. B. die Schallemissionsanalyse und die Schwingungsanalyse als Evaluierungsmethode zur Heilungseffizienz ausschließen.

Die Herstellung und Prüfung der verschiedenen Testkörper erfolgte im Rahmen des EU-Forschungsprojektes HealCon in Kooperation mit Forschungspartnern des Danish Technological Institute (DTI) in Kopenhagen sowie des internationalen Baukonzerns ACCIONA S.A. in Madrid.

## 7.1 Betonbalken

Für die Untersuchung von Biegeeinzelrissen auf deren Rissverschließung durch eine bakterienbasierte Heilmittel wurde jeweils ein Betonbalken (250x40x20 cm) mit Mischkulturen („MUC“, Kapitel 2.3) und ein Referenztestkörper ohne Heilmittel hergestellt. Zusätzlich eingebrachtes Fließmittel diente einer vergleichbaren Konsistenzanpassung (Tabelle 7-1). Um eine kontrollierte Biegezugbeanspruchung zu realisieren, kamen vier Eisenbewehrungsstäbe ( $\varnothing$  10 mm) zum Einsatz, welche über GFK-Stäbe fixiert wurden. Aufgeteilt über die volle Länge der Balken wurden nach 28-tägiger Aushärtezeit je fünf Einzelrisse mit definierten Rissweiten von 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 und 0,6 mm induziert. Der Rissabstand betrug jeweils ca. 40 cm (Abbildung 7-1, rechts). Im Gegensatz zu den zuvor untersuchten Biegebalken aus Kapitel 6, bei denen eine durchgängige Kerbe den Einzelriss einleitete, sollte bei diesen Testkörpern eine möglichst natürliche Rissoberfläche induziert werden. Um dennoch eine kontrollierte Risseinleitung an den gewünschten Positionen zu erhalten, wurden nach der Betonage an den seitlichen Balkenkanten dreieckige Aussparungen mittels Winkelschleifer mit ca. 5 cm Länge eingeschnitten. Die separiert durchgeführten manuellen 3-P-Biegeversuche (Abbildung 7-2, links) wurden mit einem digitalen Rissweitenmesser (DEMEC-DMS) über mehrere Messpunkte entlang des Querschnitts überwacht und kontrolliert. Auf diese Art und Weise konnte über den Querschnitt eine gleichmäßige Rissweite initiiert werden. Dennoch bildeten sich, besonders in Balkenmitte, vereinzelt oberflächennahe Rissverästelungen, sodass kein durchgängiger Einzelriss mehr vorlag. Dies ist neben den betonologischen Untersuchungen auch für akustische Prüfverfahren von besonderer Relevanz. Eine anschließende Verfüllung der Kerben mit schnellerhärtenden Reparaturmörtel (MasterEMACO T 1100 TIX, BASF) mit eintägiger Aushärtung hielt den Riss mit kaum relevanten Kurzzeitkriechverformung offen. Vorversuche ergaben, dass allerdings ca. 20 % zusätzliche Rissweite notwendig waren, um Langzeitschwind- und Kriechprozesse von Beginn der Rissinitiierung bis Ende der angestrebten Heilungs- und Trocknungsphase auszugleichen. Die ermittelten Endwerte sind in Tabelle 7-2 aufgeführt.

Tabelle 7-1: Betonrezeptur, basierend auf einem dänischen Standardbeton, für „REF“- und „MUC“-Betonbalken (250x40x20 cm<sup>3</sup>) in kg/m<sup>3</sup>.

	REF	MUC (Firma Ceinnmat)
Heilmittel (MUC)	0	5
CEM I 42.5 N	300	300
Flugasche	100	100
Sand 0/4 mm	680	680
Granit 4/8 mm	295	295
Granit 8/16 mm	800	800
Luftporenbildner	1	1
Fließmittel	2.3	2.7
Wasser	137	137

Tabelle 7-2: Angestrebte und erzielte Rissweiten mit manueller 3-P-Biegeprüfung für „REF“- und „MUC“-Betontestkörper.

Ziel	0,2 mm	0,3 mm	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm
REF	0,21 (± 0,003)	0,32 (± 0,01)	0,43 (± 0,01)	0,51 (± 0,008)	0,64 (± 0,018)
MUC	0,22 (± 0,007)	0,33 (± 0,008)	0,44 (± 0,011)	0,52 (± 0,031)	0,60 (± 0,013)

Die Lagerung der Balken über die gesamte Heilungsphase von sechs Wochen erfolgte in einer temperaturgeregelten Prüfhalle bei 20°C. Eine zyklische Wassereinwirkung von einer Stunde alle sechs Stunden in Form eines fließenden Wasserfilms stimulierte eine realitätsnahe Wassereexposition durch Beregnung. Zusätzlich angebrachte Vierkanteleisten an den Testkörperperrändern dienten als Berandung. Das Wasser wurde aus einem Auffangbecken durch Duschköpfe gepumpt und floss schließlich über die Balkenoberseite zurück in das Becken. Da die Seitenwände nicht versiegelt wurden, konnte Wasser vollständig in die Risse eindringen und auch entweichen. Um Calcit ausfällungen aufgrund des relativ hohen Calciumgehalts des verwendeten Leitungswassers zu vermeiden, wurde ein Ionentauscher zwischengeschaltet, der Calcium mit Natrium ersetzte. Nach Abschluss der Bewässerungsphase erfolgte eine Trocknungsphase von zwei Wochen.

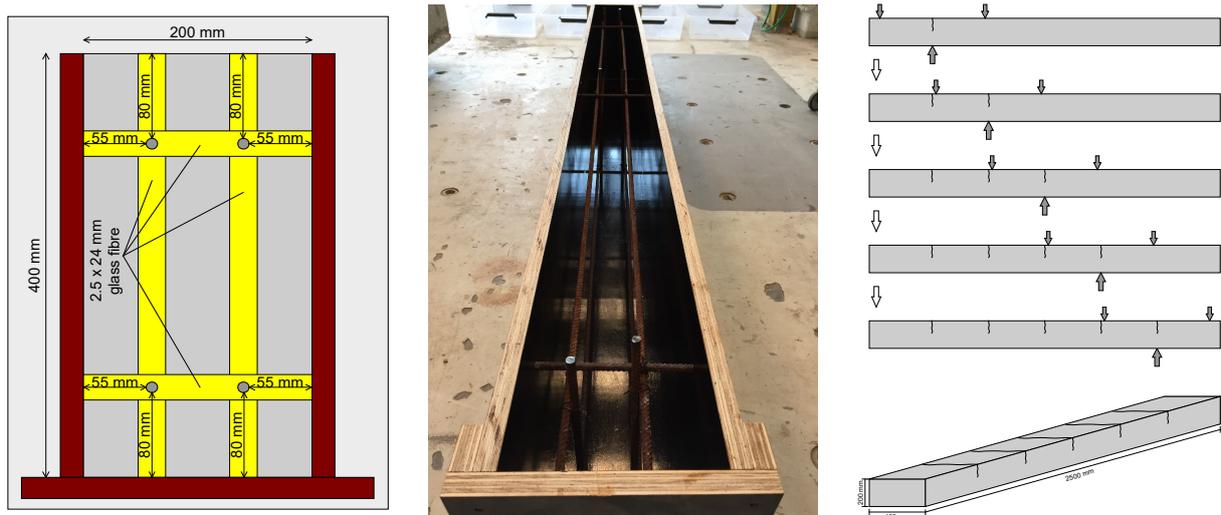


Abbildung 7-1: Links: Schalungskonzept mit integrierter Bewehrung für Betonbalken mit 250x40x20 cm. Mitte: Realbild der Schalungsform mit Bewehrung (Hinweis: Stellt einen Entwurf mit Bewehrungsstäben anstatt Glasfaserstäben dar). Rechts: Konzept der mehrfachen Rissinitiierung über manuelle 3-P-Biegeversuche. Bilder wurden erstellt von DTI Kopenhagen (Dänemark).

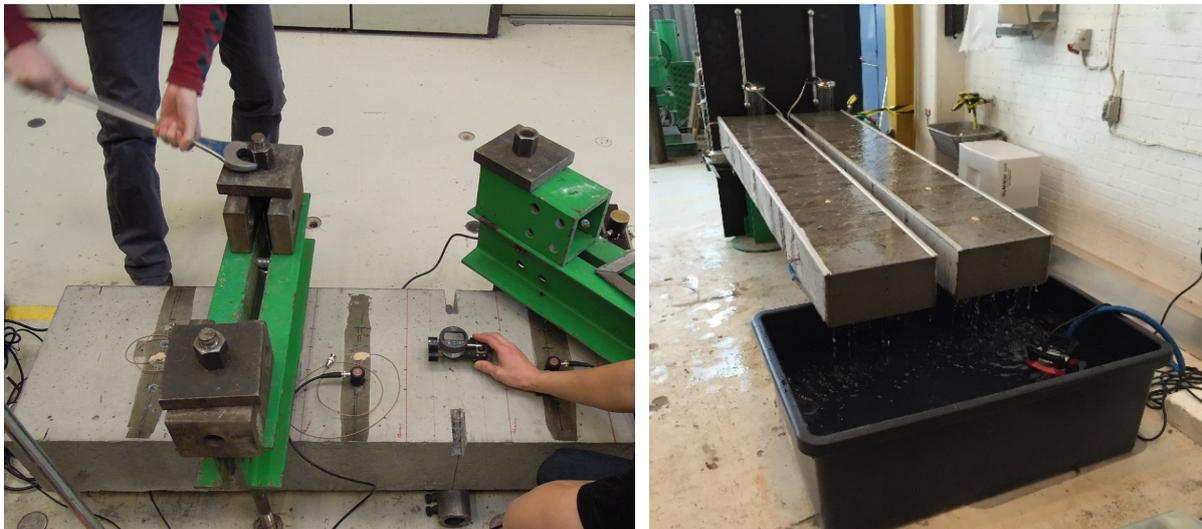


Abbildung 7-2: Links: Manuelle Rissinitiierung mittels 3-P-Biegeversuch bei gleichzeitiger Rissweitenkontrolle mittels digitalen Rissweitenmesser. Rechts: Heilungsszenario für „MUC“-Betontestbalken via zyklischer Wasserberegnung.

### 7.1.1 Betontechnologische Untersuchungen

Abbildung 7-3 zeigt die Aufsicht der „REF“- und „MUC“-Testkörper beispielhaft für 0,4 mm Rissweite sowie die Seitenansicht des „MUC“-Balkens mit 0,6 mm Rissöffnung nach Abschluss des 6-wöchigen Bewässerungszyklus. Eine oberflächliche Analyse lässt zunächst keine Differenzierung hinsichtlich

einer Rissverschließung zwischen beiden Testkörpern erkennen. An den Seitenrändern bildeten sich meist deutliche Calcitablagerungen, welche zur Rissspitze hin immer stärker zunahm. Makroskopische und mikroskopische Untersuchungen von imprägnierten Bohrkernen mit Epoxidharz mittels Dünn- und Planschliffe entlang der Rissflanken (bei einer Rissweite von 0,2, 0,4 und 0,6 mm) gaben Aufschluss über einen partiellen Rissverlauf und deren Risstiefe sowie die kristalline Calcitstruktur an den Rissflanken (Abbildung 7-4). Besonders die mikroskopischen Dünnschliffe deuten darauf hin, dass eine Rissverschließung aufgrund von autonomen Heilungseffekten mit den eingebrachten mikroverkapselten Bakterien („MUC“) ausgeblieben ist. Feine und ungleichmäßige Calcitablagerungen an den Risskanten und -Flächen des „REF“- als auch „MUC“-Testkörpers sind eher auf klassische autogene Heilungseffekte durch Carbonatisierung von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Kapitel 2.1) zurückzuführen. Um die Rissverschließung nach Abschluss der Heilungsphase flächendeckend zu validieren, erfolgte eine Aufbringung einer dreigewichtprozentigen Natriumchloridlösung ( $\text{NaCl}$ ) auf die Bauteiloberfläche beider Testkörper. Drahtlose Potentialmessungen mit eingebetteten Multi-Referenz-Elektroden ( $\text{MuRE}^{28}$ ) zur permanenten Dauerüberwachung [Price et al. 2015] chloridinduzierter Korrosion durch Forschungspartner der TTI GmbH (Stuttgart) deuteten ebenfalls auf eine nicht fluidabdichtende Rissverschließung.

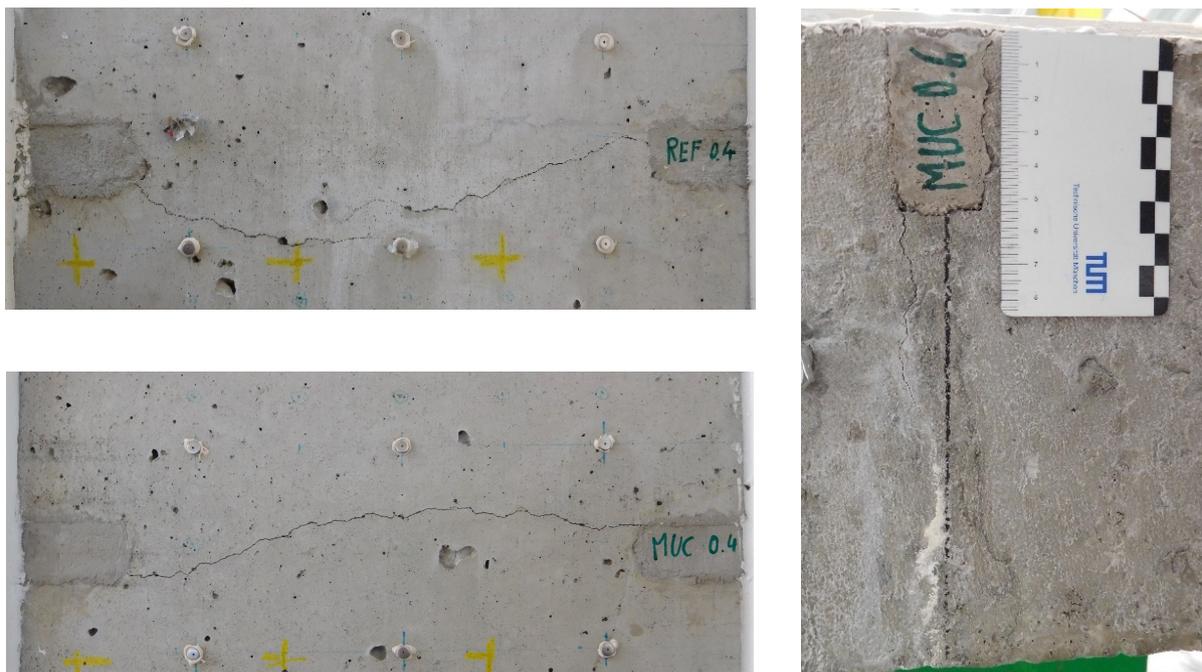
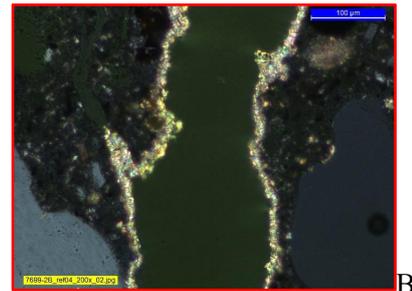
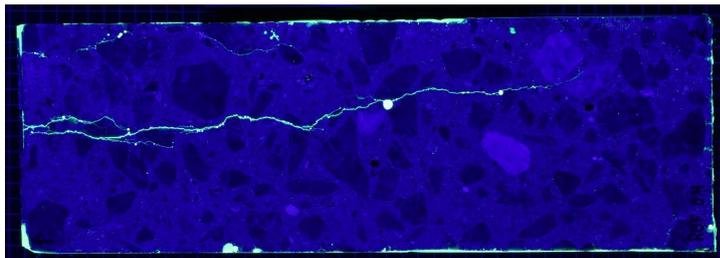
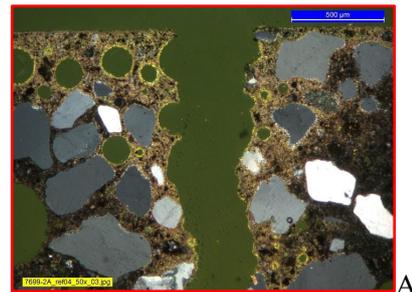
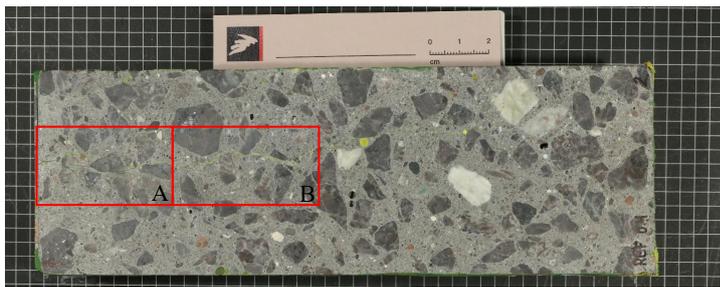


Abbildung 7-3: Links: Multiple Rissbildung an Groß-Balken nach Rissinitiierung (Aufsicht: „REF 0,4“). Rechts: Rissbetrachtung nach Heilungsphase (Seitenansicht: „MUC 0,6“).

gef<sup>28</sup> Ausführliche Beschreibung z. B. in Brenna et al. (2015)

REF (0,4)



MUC (0,4)

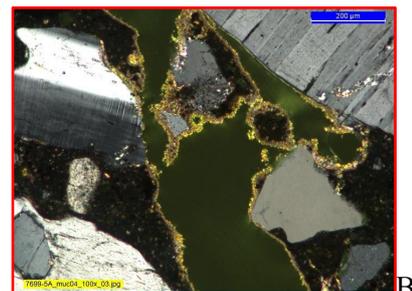
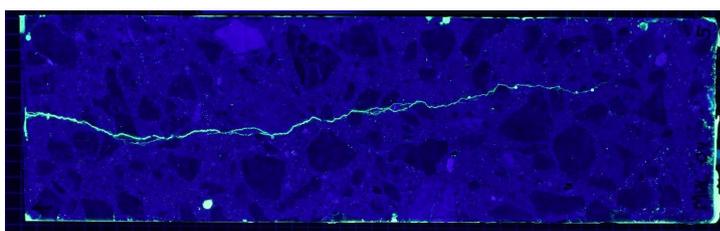
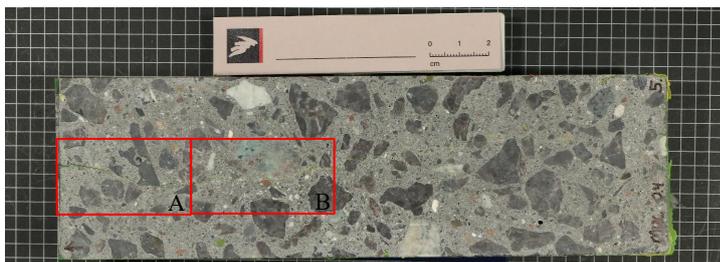


Abbildung 7-4: Makroskopische und Mikroskopische Plan- (links) und Dünnschliffe (rechts) aus Bohrkernen der Betonbalken „REF“ (oben) und „MUC“ (unten) bei einer Rissweite von jeweils 0,4 mm. Während die Planschliffe den Rissverlauf sowie die maximale Risstiefe verdeutlichen, ist mittels der mikroskopischen Dünnschliffaufnahmen stellenweise ein kristalline Calcitstruktur an den Rissflanken ersichtlich. Die Dünnschliffaufnahmen aus Sektion A geben den Bereich entlang der Bauteiloberfläche wieder, während die Aufnahmen aus Sektion B einen Ausschnitt in ca. 40-50 mm Tiefe zeigen. Aufnahmen von DTI Kopenhagen (Dänemark).

### 7.1.2 Ultraschallmessungen

Der bereits erfolgreich angewandte US-Versuchsaufbau zur Bestimmung der Risstiefe von Biegerissen (Kapitel 4.1.2) bei kleineren und transportablen Betonbalken aus Kapitel 5 und 6 sollte innerhalb der Makrobauteil adaptiert werden. Um die Betonoberfläche durch das An- und Abkoppeln der Kontaktsensoren (Olympus Panametrics V103-RB, Kapitel 4.4) mit Heißkleber zu schützen und zugleich eine möglichst geringe Flächenversiegelung zu erhalten, wurden dünne Epoxidharzbeschichtungen in schmalen Streifen ausschließlich entlang der Sensorpositionierung aufgetragen. Als US-Messequipment kam ein vereinfachter, aber mobiler Versuchsaufbau, bestehend aus einem 800V-Signalgeber mit 350 kHz Anregerimpuls (Geotron, akkubetrieben), einem 1-Kanal-Messverstärker mit 40 dB Verstärkung (Geotron VV40, batteriebetrieben), einem USB-Oszilloskop mit 62,5 MHz Abtastrate (Picoscope, Pico Technology) und einem Laptop als Recheneinheit (Abbildung 7-5) zum Einsatz. Die Geber und Empfängersensoren wurden mittig zwischen den Rissen platziert, sodass sich, identisch zur Rissdistanz, ein Abstand von 40 cm ergab. Dadurch konnten immer zwei Sensoren für die nachfolgenden Messungen des benachbarten Risses angekoppelt bleiben. Insgesamt sind je Riss vier Einzeltransmissionsmessungen mit jeweils 100 Einzelsignalen erfolgt, welche anschließend gestapelt wurden. Die sehr glatte Betonoberfläche, welche eine sehr dünne Ankoppelschicht begünstigte, und die verhältnismäßig homogene Materialstruktur (LP-Gehalt beträgt ca. 6 %), aufgrund des geringen Einfluss der bakteriellen Mikroverkapselung auf die Betonmatrix, ermöglichten einen ausreichend hohen akustischen Signalenergieeintrag mit geringen Signaldämpfungs- bzw. Schallschwächungseigenschaften. Neben der daraus resultierenden guten Reproduzierbarkeit der Signalwellenform war bei beiden Betontestkörpern in allen drei Zuständen („initial“, „gerissen“, „geheilt“) eine zuverlässige Ersteinsatzbestimmung der Longitudinalwelle möglich. Um eine akustische Brücke, bedingt durch die Verfüllung der seitlich eingebachten Kerbe, zu umgehen, erfolgten die Transmissionsmessungen des gerissenen Zustandes im noch belasteten Zustand direkt nach der Rissinitiierung.

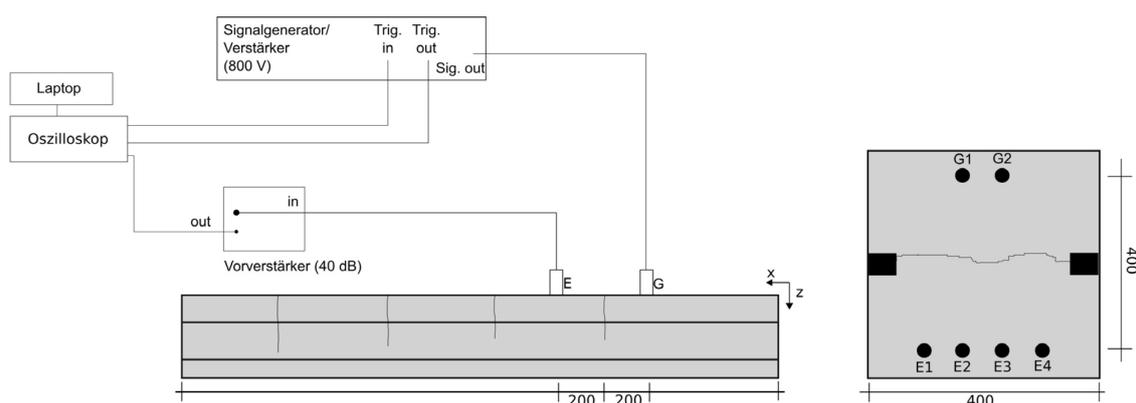


Abbildung 7-5: Links: Mobiler Versuchsaufbau für Ultraschalltransmissionsmessungen an Betonbalken. Rechts: Schematische Darstellung der Sensorplatzierung.

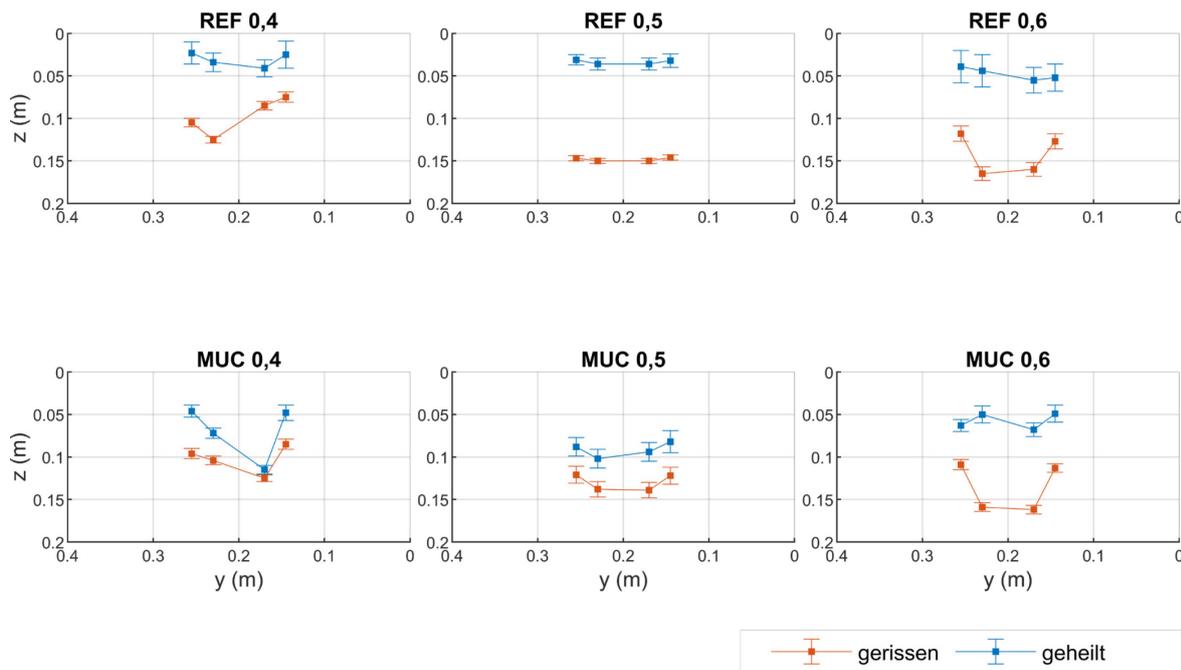


Abbildung 7-6: Risstiefenbestimmung mit ToFD-Verfahren für „REF“- und „MUC“-Betonbalken mit Rissweiten von 0,4-0,6 mm. Zur besseren Übersicht sind die jeweils vier Messpunkte je Querschnitt miteinander verbunden dargestellt.

Abbildung 7-6<sup>29</sup> zeigt die berechneten Risstiefen aus der Ersteintrittsbestimmung der P-Welle aus den Sensorkombinationen von Geber 1 (G1) zu Empfänger 1 (E1) und 2 (E2) bzw. Geber 2 (G2) zu Empfänger 3 (E3) und 4 (E4). Ein tomographischer Ansatz ist aufgrund der geringen Anzahl an Messpunkten nicht erfolgt. Die in Balkenform eingeführte Standardabweichung der Risstiefe, welche über die Standardabweichung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit des initialen Zustandes ermittelt wurde, soll den Einfluss der Materialinhomogenität widerspiegeln. Die Resultate im direkten Vergleich suggerieren, dass mit zunehmender Rissweite auch eine zunehmende Risstiefe (gerissener Zustand) initiiert wurde. Jedoch schwanken die Werte stark über den bemessenen Querschnitt. Auffällig ist, dass sich im äußeren Bereich zunehmend verringerte Risstiefen ergeben. Eine mögliche Ursache dafür könnte die naheliegende Längsbewehrung sein, welche die Betonmatrix aufgrund dessen Haftverbund stärker zusammenhält und eine akustische Brücke bildet. Ein Abgleich mit lokal entnommenen Bohrkernen zeigt, dass die Maximalwerte aus dem ToFD-Verfahren generell unterhalb der eigentlichen Risstiefe liegen (Tabelle 7-3) und folglich unterschätzt werden.

Die abschließenden US-Messungen im geheilten Zustand deuten auf keine verstärkten Rissverschließungen durch eine autonome bakterienbasierte Selbstheilung hin. Anhand der ermittelten Laufzeitdifferenz lässt sich sogar theoretisch schlussfolgern, dass der „REF“-Testkörper eine größere Rissverschließungseffizienz aufweist als ein selbstheilungsmodifizierter Testkörper. Wie allerdings durch die makro- und mikroskopischen Bildanalysen (Abbildung 7-3/Abbildung 7-4) bestätigt, lassen

<sup>29</sup> aus organisatorischen Gründen war die Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren nur für Rissweiten mit 0,4-0,6 mm möglich gewesen.

sich die konstant verminderten Risstiefen über alle Rissweiten bei beiden Testkörpern auf weitestgehend autogenen Heilungseffekten wie z. B. Calicitausbildungen und durch Langzeitschwind- und Kriecheffekte beschränken.

Tabelle 7-3: Risstiefenbestimmung aus Bohrkernentnahme (durchgeführt von DTI, vgl. Abbildung 7-4) und maximale Risstiefe ermittelt mit US-Transmissionsmessungen (nach Bruch).

Testkörper	Risstiefen (mm)	
	Bohrkern	max. Wert aus US-Messung (gerissen)
<b>REF 0,4</b>	165	125
<b>REF 0,6</b>	180	165
<b>MUC 0,4</b>	175	125
<b>MUC 0,6</b>	175	162

Bei Betrachtung der vollen Signallängen über einen zweidimensionalen Amplitudenplot (Abbildung 7-7) konnte eine vergleichsweise ausgeprägte Schallschwächung im geheilten Zustand über alle Testkörper detektiert werden. Dieses Verhalten würde mit bereits vorhandenen Studien im Einklang stehen, wobei demnach mit Zunahme des Carbonisierungsgrades (Ansammlung von Carbonisierungsprodukten in Mikrorissen und Luftporen) sich auch die amplitudenbasierten, nichtlinearen Parameter reduzieren [Kim et al. 2016]. Auch wenn eine Amplitudenbetrachtung mit Kontaktsensoren als kritisch gilt, weist dieses Ergebnis anhand der Vielzahl an durchgeführten Messungen einen entsprechenden Trend auf. Eine Validierung der Signalreproduzierbarkeit (Abbildung 7-7, „Reliabilität“) durch zwei unabhängige Einzelmessungen (M1, M2) mit jeweils vollständiger Sensorneuankopplung verdeutlicht zudem, dass die starke Signalschwächung der „REF“- und „MUC“-Testkörper vom gerissenen zum geheilten Zustand die Amplitudenvarianz der Vergleichsmessung von M1 und M2 deutlich übersteigt. Dies würde das veränderte Amplitudenverhalten aufgrund der Wassereexposition bestärken und den starken Einfluss regulärer autogener Effekte innerhalb der Untersuchung mit akustischen Prüfverfahren verdeutlichen. Eine Abgrenzung zu autonomen Selbstheilungseffekten wird damit zunehmend erschwert.

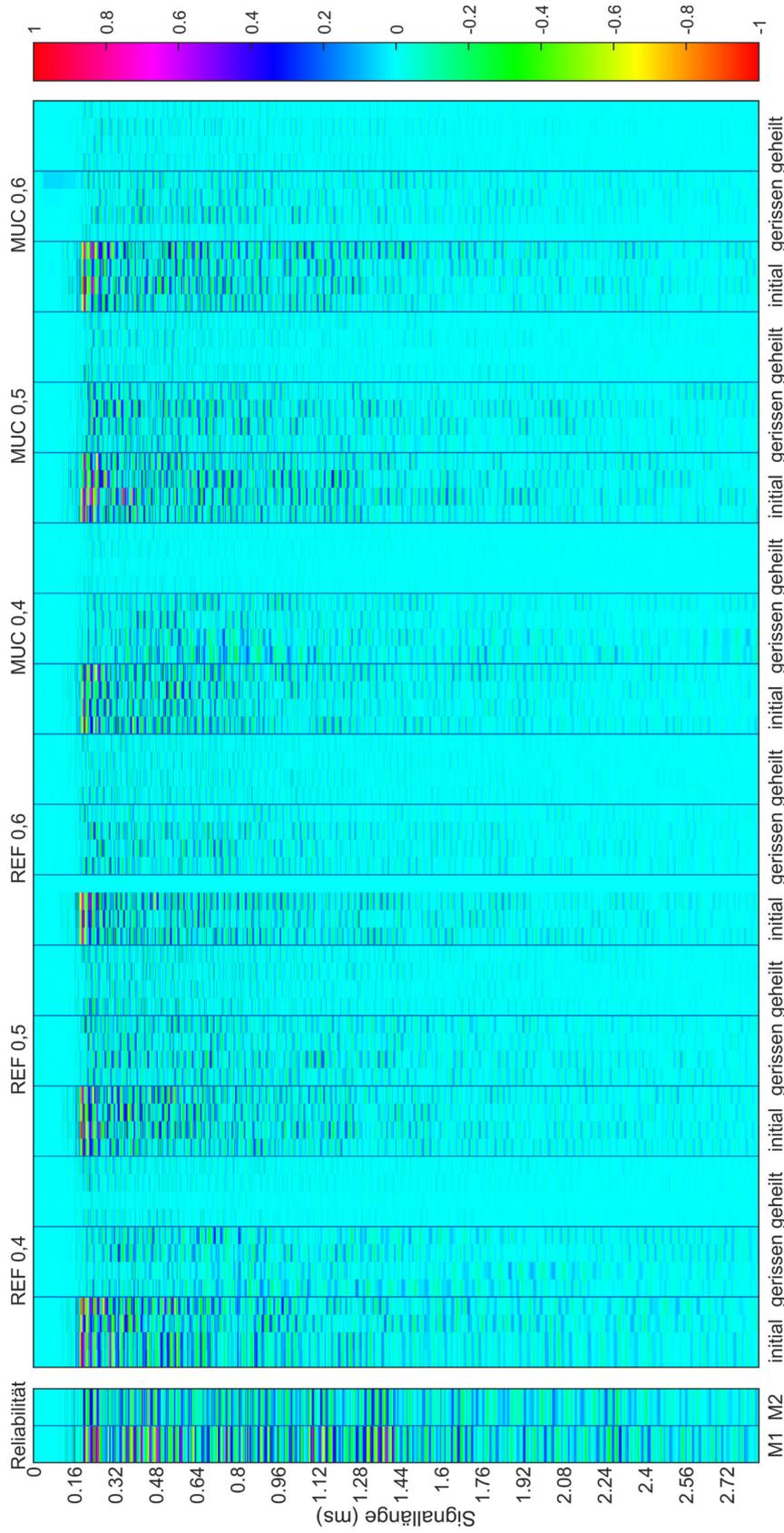


Abbildung 7-7: 2-D Amplitudenplot der US-Transmissionssignale über die Zustände „initial“, „gerissen“, „geheilt“ der Betonbalken „REF“ und „MUC“. Für eine einheitliche Amplitudenbetrachtung im Wertebereich zwischen  $\pm 1$  erfolgte für jede individuelle Rissweite eine Normierung der Zustände auf den Maximalwert der initialen Ausgangsmessung. Fehlerhafte Signale wurden durch Leerspalten (Amplitude = 0) ersetzt.

## 7.2 Betonplatten

Betonplatten mit verschiedenen Selbstheilungsmitteln sollen Aufschluss über das Rissabdichtungsvermögen von kontrolliert induzierten durchgängigen Mikrorissen geben. Unter Berücksichtigung der Selbstheilungs- und Bemessungskonzepte (Wasserbeaufschlagung und Evaluierungsmethoden) sowie der Erkenntnis von Elgehausen (2004) hinsichtlich der Rissinitiierung, wurden rechteckige Betonplatten mit Abmessungen von 120x80x20 cm (192 L) von der Firma Acciona S.A. (Spanien) in Madrid hergestellt. Das Bewehrungskonzept mit  $\varnothing$  12 mm Bewehrungsstäben sowie die lokalen Punkte für die Rissinitiierung sind in Abbildung 7-8 gegeben.

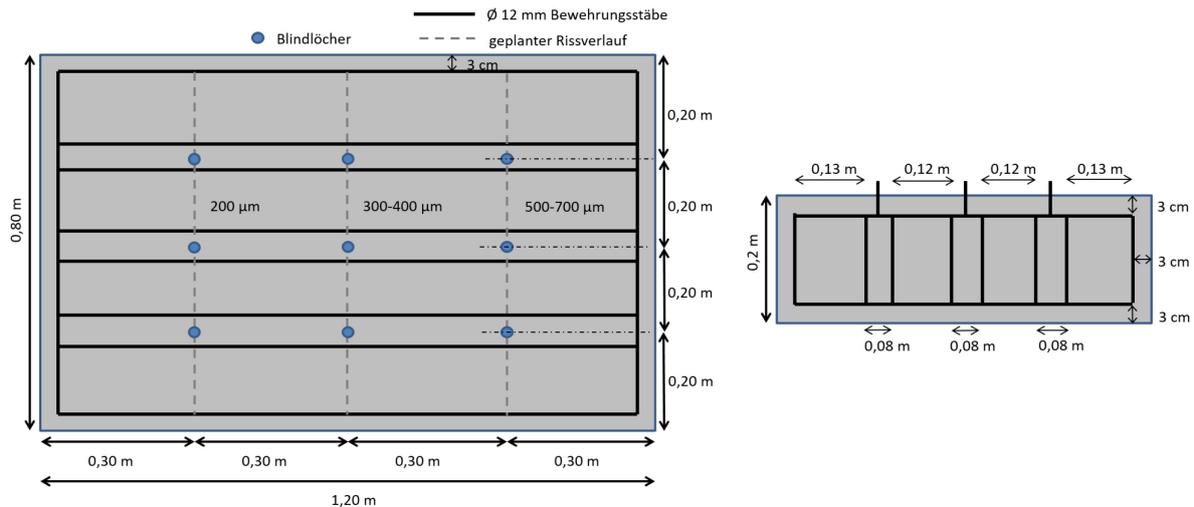


Abbildung 7-8: Bewehrungs- und Rissinitiierungskonzept für Betonplatten. Die spezielle Bewehrungsanordnung ermöglichte mittels Einschlagkeile und Schwerlastanker eine gezielte Rissöffnung mit anschließender Stabilisierung.

Insgesamt wurden neben einem Referenztestkörper drei Betonplatten mit jeweils unterschiedlichen Heilungsmitteln hergestellt: Imprägnierte Liapor-Blähtonkugeln mit Bakterien (TU Delft), mikroverkapselte Bakteriensporen (VTT/Devan) und modifizierte Hydrogele (Ceinnmat). Die Konsistenzanpassung der Betonmischungen mit einem einheitlichen w/z-Wert von 0,5 erfolgte über eine Hinzugabe von Fließmittel (Tabelle 7-4). So konnte ein konsistentes Ausbreitmaß von 90-100 mm erzielt werden. Das Hydrogelgranulat sowie die bakterienimprägnierten Blähtonkugeln wurden direkt zusammen mit dem Sand- und Grobkornzuschlag der Zementsuspension hinzugegeben. Die

mikroverkaspelten Sporen („ME“) wurden zuvor mit einer  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ -Lösung (Ca-Quelle) sowie Hefeextrakt (Nährstoff) angereichert und anschließend mit dem Anmachwasser angemischt.

Ähnlich der Betonbalken in Kapitel 7.1 sollte die Selbstheilungseffizienz zwischen Rissweiten von 200-700  $\mu\text{m}$  evaluiert werden. Um möglichst geradlinig verlaufende Risse zu erhalten, wurden während der Betonage an jeweils dreimal drei Stellen Metallhülsen eingebracht, welche nach kurzzeitigem Ansteifen des Betons wieder herausgezogen wurden. Nach 28-tägiger Aushärtezeit erfolgte die Rissinitiierung via Einschlagkeile in den vorhandenen Blindlöchern (Abbildung 7-8, links unten). Die spezielle Bewehrungsanordnung führte schließlich zu den gewünschten horizontal verlaufenden Rissöffnungen (kurze Seite). Anschließend stabilisierten eingebrachte Schwerlastanker die Risse. Über punktuelle Lupenmessungen wurde folglich die entsprechende Rissweite eingestellt. Wie anhand der entstandenen oberflächlichen Rissformationen in Abbildung 7-9 ersichtlich, sind neben relativ geradlinig verlaufenden Rissen auch zahlreiche Mehrfachrisse und starke Betonabplatzungen entstanden. Im Nachhinein hatte sich jedoch herausgestellt, dass die Rissinitiierung des „REF“- und „SAP-G“-Testkörpers nicht zu vollständig durchgängigen Rissen geführt hat. Um die bereits durchgeführten zerstörungsfreien Prüfverfahren nicht zu beeinflussen, kam es zu keiner nachträglichen Rissaufweitung. Eine Übersicht über die untersuchten Testkörper findet sich in Tabelle 7-5.

Für die darauffolgende Heilungsphase wurden die Schwerlastanker wieder entnommen und die Löcher wasserdicht verschlossen. Die Versiegelung erfolgte zunächst am Boden mit Epoxidharz sowie einer Beschichtung mit Polyurethanspray. Anschließend wurde das Loch mit Mörtel verfüllt und die Oberfläche wiederum mit Epoxidharz abgedichtet. Um die Betonoberfläche während der Heilungsphase vollständig zu benetzen, sind zur Seitenfläche hin offene Risse mit Butylbändern abgeklebt sowie seitliche Leisten um den Testkörper angebracht worden. Die 6-wöchige Wasserbeaufschlagung umfasste im geschlossenen Prüfraum (20°C) eine tägliche einstündige stationäre Wasserbeaufschlagung.

Tabelle 7-4: Betonrezepte sowie Druckfestigkeitswerte (nach 28 Tagen) für Betonplatten mit unterschiedlichen Selbstheilungsmitteln in  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

	<b>REF</b>	<b>SAP G</b>	<b>Liapor</b>	<b>ME</b>
<b>Heilmittel</b>	0	1,75	136	21
<b>CEM I 52.5 N SR</b>	350	350	350	350
<b>Sand 0/4mm</b>	960	960	840	960
<b>Granit 6/10 mm</b>	730	730	486	730
<b>Granit 10/20mm</b>	195	195	108	195
<b>Fließmittel</b>	1.4	5,95	1,75	5,95
<b>Wasser</b>	175	175	175	175
<b>Druckfestigkeit nach 28 d (MPa)</b>	<b>47,1</b>	<b>41,2</b>	<b>38,7</b>	<b>33,0</b>

Tabelle 7-5: Übersicht über untersuchte Betonplatten mit unterschiedlichen Selbstheilungsmitteln.

<b>Testkörper</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Hersteller (Heilmittel)</b>	<b>Risstyp</b>
REF	Beton ohne Heilungsmittel (Referenztestkörper)	ACCIONA	Nichtdurchgehende Risse *
SAP G	Beton mit modifizierten superabsorbierenden Polymeren (SAP G)	Ceinnmat	Nichtdurchgehende Risse *
BAC	Beton mit bakterien-imprägnierten Liapor-Blähtonkugeln	TU Delft	Durchgehende Risse
ME	Beton mit mikroverkapselten Bakteriensporen	VTT/Devan	Durchgehende Risse

\* unbeabsichtigte Rissinitiierung für Testkörper „REF“ und „SAP G“

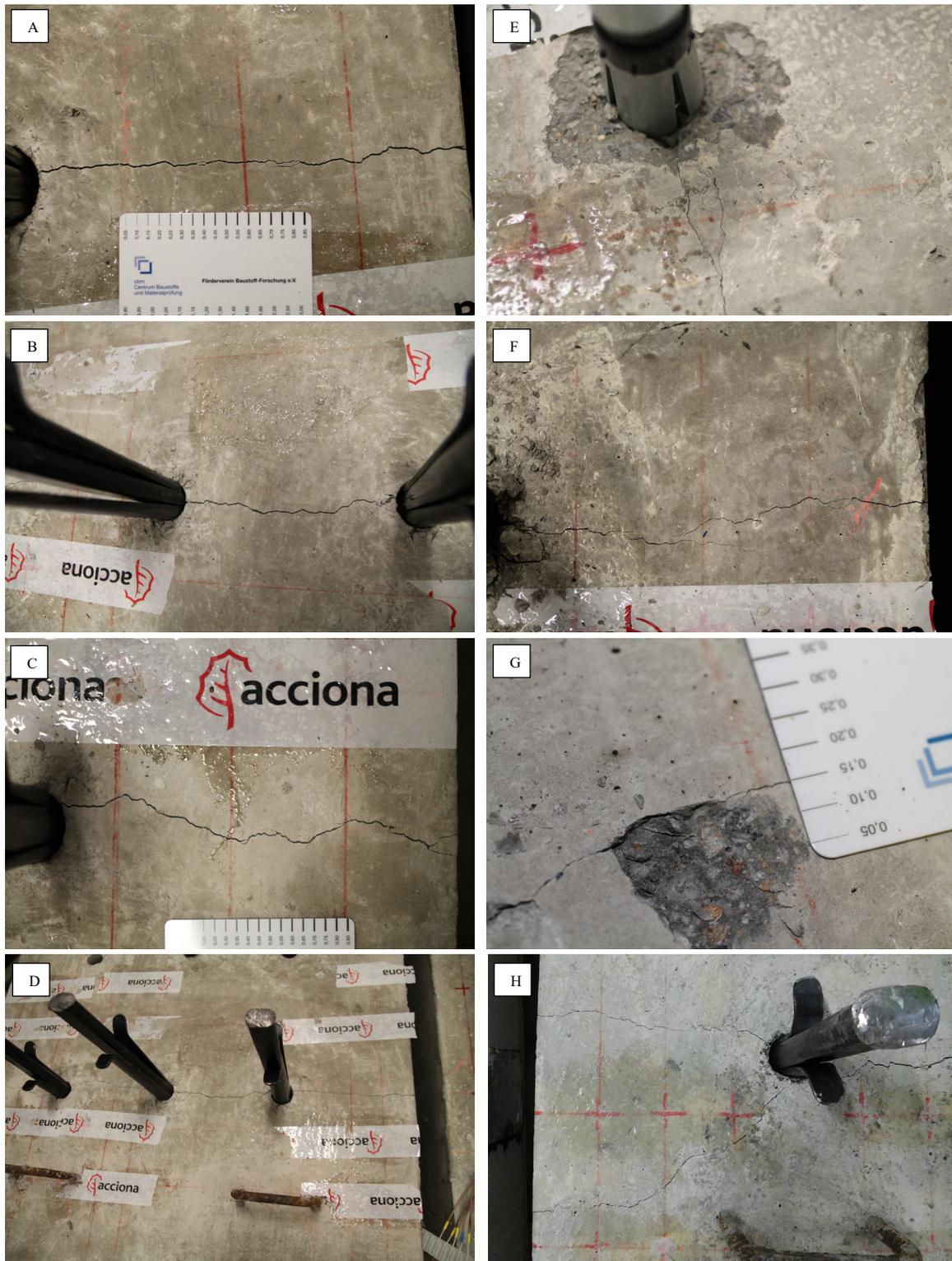


Abbildung 7-9: Rissformationen an verschiedenen Betonplatten, initiiert durch Einschlagkeile und Schwerlastanker. Linke Spalte (A-D): überwiegend gleichmäßige Einzelrisse. Recht Spalte (E-H): Oberflächenbeschädigungen, Mehrfachrisse und Rissvergabelungen sowie ungleichmäßige Rissverläufe.

### 7.2.1 Betontechnologische Untersuchungen

Ein Vergleich von oberflächlichen Rissformationen vor und nach der Heilungsphase lässt optisch keine Rissverschließung erkennen. An den Risskanten sowie im Rissinneren sind keine offensichtlichen Spuren von  $\text{CaCO}_3$ , z. B. in Form von weißen Partikelablagerungen, vorhanden. Ein Vergleich von einzelnen oberflächlichen Rissen vor und nach der Heilungsphase ist für alle hergestellten Betonplatten in Abbildung 7-10 gegeben. Die Testkörper mit einer bakterienbasierten Selbstheilung („BAC“/„ME“) zeigten hingegen an der Unterseite, entlang der Rissstrukturen, starke Ausflockungen von  $\text{CaCO}_3$ <sup>30</sup>. Da jedoch der Referenz- („REF“) sowie der mit Hydrogelen („SAP G“) versetzte Testkörper keine eindeutigen durchgehenden Risse aufwiesen, ist mit solch ähnlichen Ablagerungen auch nicht zu rechnen gewesen. In Tabelle 7-6 sind die Resultate von Wasserpermeabilitätsuntersuchungen auf Basis von Durchflussmessungen innerhalb einer Zeitspanne von 15 min gegeben. Den Ergebnissen zufolge konnte dennoch bei allen Platten trotz der unterschiedlichen Rissinitiierungen immer ein Wasserdurchfluss zwischen Betonoberfläche und -Unterseite nachgewiesen werden. Eine Differenzierung bzgl. der Selbstheilungseffizienz kann lediglich zwischen der Art der Rissinitiierung, also durchgehend und nicht-durchgehend, ausgemacht werden. Besonders beim „SAP G“-Testkörper wäre aufgrund der schnellen Absorbierfähigkeit des eindringenden Wassers mit einer verstärkten und kurzfristigen Rissabdichtung zu vermuten gewesen. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass Rissweiten von bis zu 700  $\mu\text{m}$  nicht für eine zuverlässige Verschließung mit Hydrogelen generell vorgesehen ist. Zudem ist die Wasserbeaufschlagung nicht mit kontrollierten Mengen erfolgt, wonach die absorbierte Menge hätte gegebenenfalls ermittelt werden können. Von einem wissenschaftlichen Mehrwert kann jedoch aufgrund der individuellen Rissformation je Testkörper nicht ausgegangen werden. Verstärkend kommt hinzu, dass sich aufgrund der ungleichmäßig verteilten Rissstruktur- und Charakteristik bereits vor der Heilungsphase ein stark variierender Wasserdurchfluss mit einer Standardabweichung von ca. 24 % ergab (Tabelle 7-6). Eine qualitative oder quantitative Evaluierung der Selbstheilungseffizienz mittels großflächiger Wasserpermeabilitätsmessungen wird damit wesentlich erschwert. Für eine empirische Überprüfung der Selbstheilungseffizienz ist daher eine Vielzahl an Testobjekten erforderlich.

Tabelle 7-6: Wasserpermeabilitätstest zur Bestimmung der Selbstheilungseffizienz von Betonplatten. Zu berücksichtigen ist die unterschiedliche Rissinitiierung zwischen „REF“/„SAP G“ und „BAC“/„ME“ (vgl. Tabelle 7-5). Versuchsdurchführung und Ergebnisdokumentation von ACCIONA S.A..

Testkörper	Vor Heilung („gerissen“) Wasserfluss (gr. in 15 min)	Nach Heilung („geheilt“) Wasserfluss (gr. in 15 min)	Heilungseffizienz (%)
REF	176	166	6
SAP G	135	123	9
BAC	205	162	21
ME	120	98	18
Std (%)	24	24	53

<sup>30</sup> Nachweise erfolgte über energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)

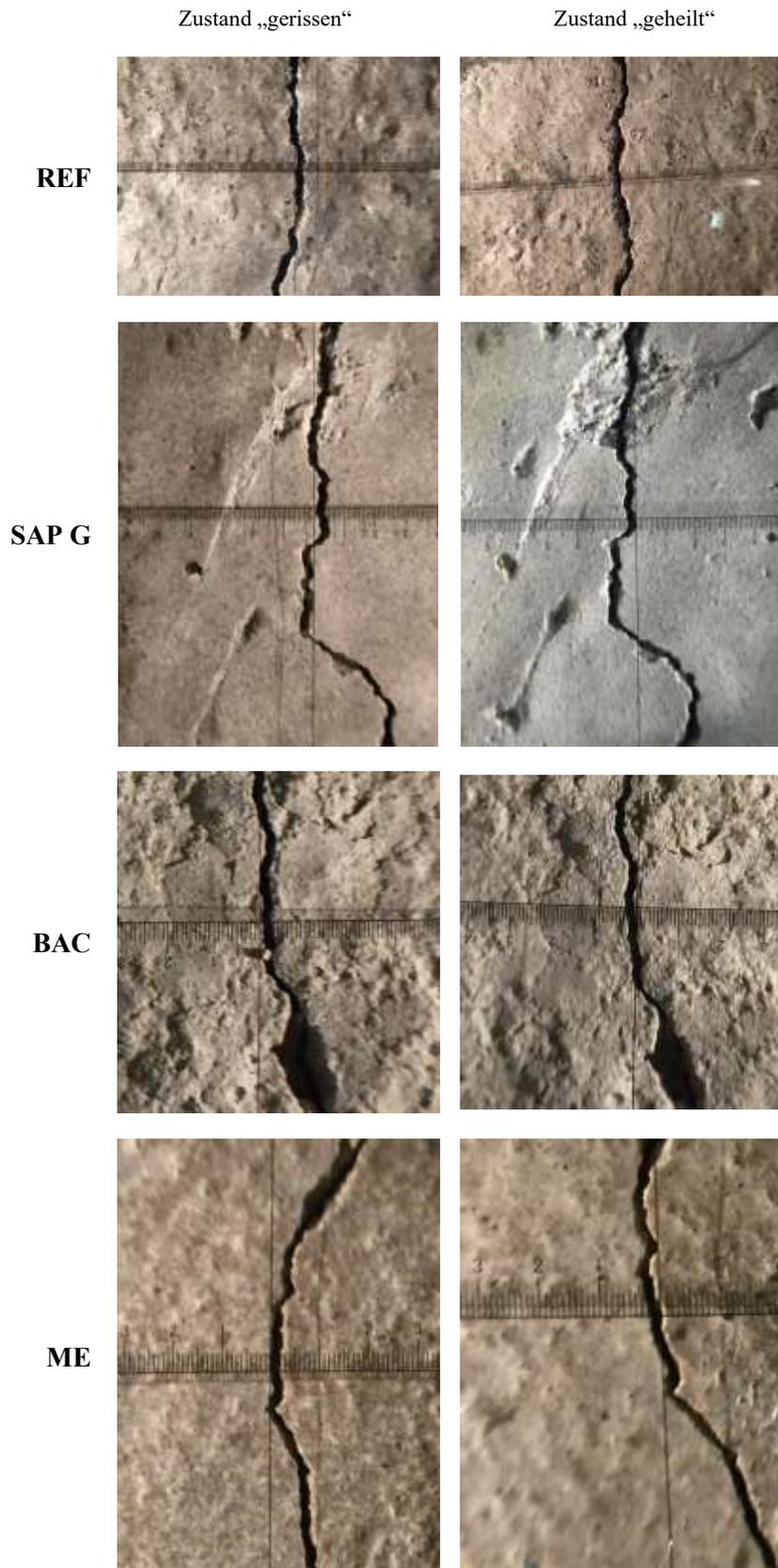


Abbildung 7-10: Optischer Vergleich (Lupenaufnahmen) von oberflächlichen Rissen im definierten Zustand „gerissen“ und „geheilt“ für Betonplatten mit unterschiedlichen Selbstheilungsmechanismen. Bilder aufgenommen von ACCIONA S.A..

## 7.2.2 Ultraschall- und Oberflächenwellenmessungen

Der werkstoffspezifische Aufbau der plattenähnlichen Betonstrukturen, das individuelle Konzept zur Einbringung von gezielten Rissen, sowie der anschließende Versuchsaufbau zur Untersuchung der autonomen Rissverschließung, stellte neue Herausforderungen hinsichtlich der Adaptierung kompatibler Mess- und Prüfverfahren dar. Während mit den zuvor bemessenen Betonbalken (Kapitel 7.1) Risstiefenbestimmungen mittels US-Laufzeitmessungen (ToFD) möglich waren, musste in diesem Fall mit wesentlich größeren Stör- und Schallschwächungseffekten gerechnet werden. Neben der Rissstruktur waren u. a. der hohe Bewehrungsgrad, herausstehende Eisenbügel und die raue bzw. unebene Betonoberfläche letztlich für eine inhomogene Datenanalyse mit teils starken Signalschwankungen und -Abweichungen innerhalb von relevanten Zeitbereichen mitverantwortlich. Eine Auswertung von einzelnen Signalparametern wurde daher ausgeschlossen. Vielmehr sollte ein qualitativer Vergleich der sich ausbreitenden akustischen Schallwellen angestrebt werden. Dafür wurde ein zusätzlicher Empfängersensor vor den zu erwartenden Rissen (vgl. Abbildung 7-8, oben links) angebracht, welcher als Referenzsensor die aus der Heilungsphase beeinflusste strukturelle Materialveränderung dokumentieren sollte. Da die Messungen bei der Firma ACCIONA S.E. in Madrid in einem limitierten Zeitfenster durchgeführt werden mussten, kam das mobile und schnell zu installierende Messsetup aus Kapitel 7.1.2 zum Einsatz.

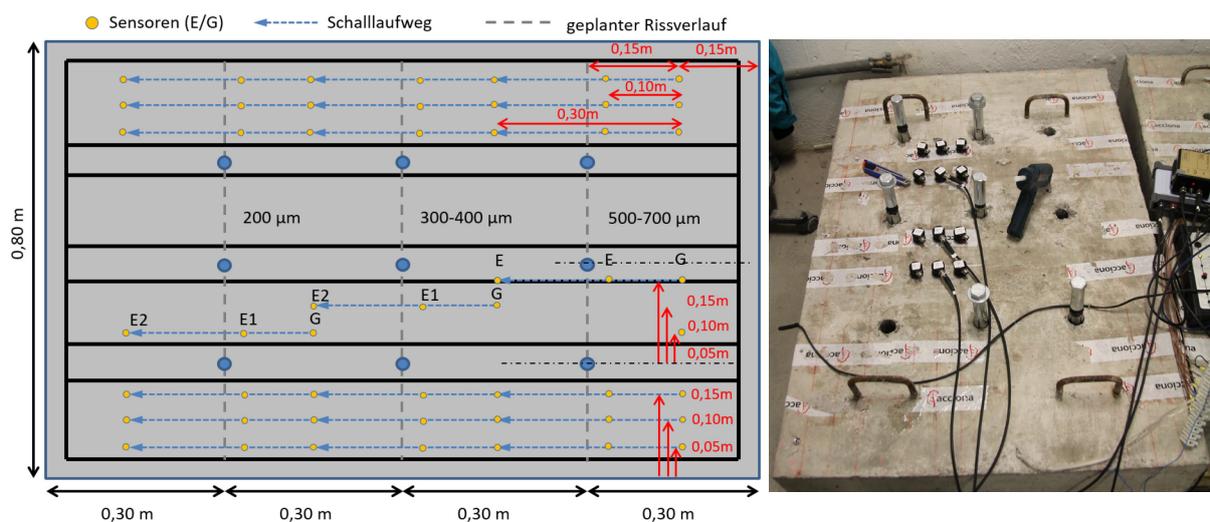


Abbildung 7-11: Links: Schematischer Versuchsaufbau für Ultraschall- und Impaktmessungen an Betonplatten. Rechts: Realbild einer US-Messung an REF-Testkörper.

Der Versuchsaufbau, welcher in Abbildung 7-11 gegeben ist, zeigt die Positionsanordnungen der Geber- (G) und Empfängersensoren (E1/E2). Insgesamt konnten damit bis zu 27 Einzelpositionsmessungen je Testkörper erfolgen<sup>31</sup>. Für ein verbessertes S/N-Verhältnis wurden je Messposition 100 US-Einzelsignale gestapelt. Aufgrund der fixen Signalverstärkung von 40 dB (Geotron VV40) kam es

<sup>31</sup> Reduktion, wenn Ankopplung an vorhergesehener Messposition z. B. durch Eisenbügelbewehrung nicht möglich war.

stellenweise zum Signalklippen. Um Falschdarstellungen zu vermeiden, wurden diese in der Ergebnisdarstellung aussortiert und durch Leerspalten (Amplitude=0) ersetzt.

Parallel zu den Ultramessungen mit SE-Sensoren (Panametrics V103-RB) sollte zusätzlich ein weiteres Messkonzept mit piezoelektrischen Beschleunigungssensoren (PCB Piezotronics - Model 352C33) und Impaktanregung via Impakthammer (Brüel & Kjaer - Typs 8204) Aufschluss über deren Eignung und Praktikabilität geben. Gleiches Konzept wurde bereits von Chai et al. (2010b) für eine alternative Risstiefenbestimmung von oberflächennahen Rissen mit Oberflächenwellen (Rayleigh-Wellen) eingesetzt. Weiterhin gehörten zum Messequipment eine ICP-Versorgungseinheit (PCB-480B21, PCB Piezotronics) sowie ein dreikanaliger USB-Oszilloskop mit 10 MHz Abtastrate (HS4, TiePie engineering). Da die Sensorik identisch mit der aus der Schwingungsanalyse ist, besteht der große Vorteil aus der schnellen und reversiblen Ankopplung sowie der energiereichen Schallinduzierung. Somit sind auch Messungen über größere Distanzen möglich. Die im Hammer integrierte Kraftmessdose ermöglicht zudem eine Amplitudennormierung auf Empfängerseite. Zu berücksichtigen ist jedoch die im Vergleich zu US-Signalgeneratoren tieffrequente Signalanregung. In diesem Fall konnte an den Betonoberflächen eine Frequenzanregung bis ca. 45 kHz (bei -60 dB) erzielt werden. Ähnlich zur Ultraschallprüfung wurde eine Vielzahl an Impaktanregungen je Messpunkt durchgeführt und anschließend gestapelt. Kam es zu einer Signalübersteuerung oder zu Prelleffekten<sup>32</sup>, konnten diese über ein Postprocessing herausgefiltert und ebenfalls durch Leerspalten (Amplitude=0) ersetzt werden.

Die Ergebnisse der Ultraschallprüfungen sind als zweidimensionaler Amplitudenplot in Abbildung 7-12 und Abbildung 7-13 dargestellt. Dabei wurden alle Einzelpositionsmessungen je Zustand parallel nebeneinander zusammengefasst. Die ungleichmäßige Sensorankopplung an der Betonoberfläche hat bereits zwischen einzelnen Messpunkten zu starken Maximalamplitudenstreuungen geführt, sodass für eine einheitliche Ergebnisbetrachtung die Empfangssignale von E1 und E2 auf ihren jeweiligen Amplitudenmaximalwert normiert werden mussten. Über eine Abschätzung der mathematischen Beziehung zwischen P- und R-Welle (Gl. 3-27/Gl. 3-31) charakterisiert dieser Maximalwert im initialen Zustand das Amplitudenmaximum der sich ausbreitenden Oberflächenwelle. Das verhältnismäßig klare und homogene Signalbild des Sensors E1 kann dabei als vergleichende Referenzmessung zu den anderen Zuständen betrachtet werden. Anhand der US-Ergebnisse in den einzelnen Zuständen („initial“, „gerissen“, „geheilt“) lassen sich mehrere Auffälligkeiten ausmachen, welche mit der Rissinitiierung bzw. den unterschiedlichen materialspezifischen Charakteristika korrelieren. So zeigen die auf mikrostruktureller Ebene homogenen Betontestkörper „REF“, „SAP G“ und „ME“ im initialen Zustand für E1 und E2 ein sehr gleichmäßiges Amplitudenverhalten mit Eintreffen der energiereichen Oberflächenwelle sowie ein baldiges und gleichmäßiges Abklingen (bis ca. 0,1 ms). Die eingebrachten porösen Blähtonkugeln im „BAC“-Betonbalken verursachten hingegen eine länger anhaltende energiereiche Signalwellenfront (bis ca. 0,15 ms).

Im gerissenen Zustand unterscheiden sich die Signalformen für E1 vom „REF“- und „SAP G“-Testkörper nur minimal, welche sich mit leicht veränderten Ankopplungsbedingungen begründen

---

<sup>32</sup> mehrfach, direkt aufeinanderfolgende Hammerschläge innerhalb einer Messung.

lassen. Die Signale am E2 hingegen bilden ein sehr ungleiches Amplitudenmuster, wobei kein gleichmäßiger zeitlicher Versatz der Oberflächenwelle erkennbar ist.

Die innerhalb der „BAC“- und „ME“-Testkörper überwiegend durchgehenden Risse verhinderten eine gleichmäßige Schallausbreitung über den gesamten Testkörper. Die daraus resultierenden Rückstreuungen zeichnen ein inhomogenes und willkürlich zerstreutes Amplitudenbild. Dieses Verhalten korreliert sehr gut mit den Rissformationen an der Betonoberfläche, welche teilweise auch den Schalllaufweg zwischen Geber und E1 beeinflusst haben (Abbildung 7-9: Bild H). Dass dennoch Schallwellen von E2 detektiert wurden beruhte auf einer Vielzahl an partiellen Kontaktpunkten der Betonmatrix. Daher ließen sich diese multiplen Schallreflektionen mit der eingestellten Signalaufzeichnungslänge ebenfalls noch detektieren.

Nach der 6-wöchigen Heilungsphase konnten für E1 und E2 des „REF“-Testkörpers optisch keine Unterschiede zum gerissenen Zustand festgestellt werden. Während ebenfalls für E1 der „SAP-G“-Betonplatte kaum relevante Änderungen vorhanden sind, kann für E2 eine minimal verkürzte Signalankunftszeit detektiert werden. Ob diese aus einem reduzierten Schalllaufweg infolge einer globalen autogenen Selbstheilung oder dennoch einer globalen Materialveränderung resultierte ist ohne das Hinzuziehen zusätzlicher mineralogische Analyseverfahren nicht möglich. Eine Differenzierung hinsichtlich der anvisierten Rissweiten zwischen 200-700  $\mu\text{m}$  ist jedoch nicht erkennbar. Eine ähnliche Diagnose gilt für den „BAC“- sowie „ME“-Testkörper. Neben den reduzierten Schalllaufzeiten für E2, hat sich auch ein rückläufiges Amplitudenbild für E1 nach der Heilungsphase ergeben. Dieses konsistente Gesamtbild würde darauf hindeuten, dass es zu einer Bildung von akustischen Brücken in den entsprechenden Risszonen kam. Die vorgefundenen Calcitablagerungen an den Rissstrukturen an der Betonunterseite verstärken diese Annahme. Da ein direkter Vergleich mit dem „REF“-Testkörper aufgrund der abweichenden Rissinitiierung nicht möglich ist, kann jedoch nicht gesagt werden ob es sich dabei um autogene oder auch autonome Rissverschlüßungen handelt. Aufgrund nicht vorhandener mikroskopischer Gefügeuntersuchungen (z. B. Beton-Dünnschliff) ließ sich dieses Resultat auch nicht weiterführend eruieren.

Die parallel zur US-Messung durchgeführten impaktbasierten Oberflächenwellenexperimente sind in Abbildung 7-14 und Abbildung 7-15 gegeben. Da die Einzelmessungen individuell auf deren Impaktanregung normiert wurden, unterscheiden sich die Amplitudenmaximalwerte auch innerhalb eines Zustandes von Messpunkt zu Messpunkt. Dennoch befinden sich die Signalenergien innerhalb einer Größenordnung, dass für die zweidimensionale Signalformbetrachtung, auch zwischen den Zuständen, keine weiteren Modifikationen nötig waren. Weiterer entscheidender Einflussfaktor auf die Signalwellenform war die Frequenzanregung, welche durch die Kontaktzeit und den Kontaktwinkel der Hammerspitze mit der Betonoberfläche beeinflusst wurde [McLaskey et al. 2010a]. Dieses Verhalten zeigt sich deutlich im initialen Zustand von E1 und E2 des „REF“-Testkörpers. Grund hierfür war vermutlich die noch leicht feuchte Oberfläche, die den Anschlag unterschiedlich stark gedämpft hat. Im Gegensatz zur US-basierten Anregung lässt sich über die tieffrequente Anregung keine P-Welle detektieren. Dabei entspricht innerhalb der Impaktanregung die amplitudenstarke Wellenfront dem Ersteinsatz der Oberflächenwelle.

Im Gegensatz zum Amplitudenmuster der US-Anregung zeigt sich, dass nach der Rissinitiierung ein gleichmäßiger Versatz in den Ankunftszeiten für E2 lokalisiert wird. Dies gilt sowohl für nicht-durchgehende („REF“/„SAP G“) als auch durchgehende („BAC“/„ME“) Risse. Diese teilweise sequenzierten Zeitversätze lassen sich aufgrund der Schwankungen jedoch nicht der Rissweiteninitiierung zuordnen. Ähnlich zu den US-Messungen äußern sich die vorhandenen ungeplanten „Querrisse“ im gerissenen Zustand für E1 des „BAC“- und „ME“-Testkörpers unverkennbar in der Signalform, besonders in der energiereichen Coda. Auffällig jedoch ist, dass das Amplitudenbild im gerissenen Zustand für E2 des „BAC“- und „ME“-Testkörpers wesentlich homogener und gleichmäßiger ist und sich in der Coda unwesentlich von der nicht-durchgehenden Rissfraktur unterscheidet.

Für eine Beurteilung der Selbstheilungseffizienz offenbart der zeitliche Versatz von E2 der Signalwellenfront die markanteste Charakteristik. Während der Ersteinsatz der Oberflächenwelle des „REF“-Testkörpers zwischen den beiden Zuständen kaum variiert, weisen die Betonplatten mit „BAC“ und „ME“ ein rückläufiges Signalanfangsmuster, ähnlich des initialen Zustandes, auf. Auch die nur minimal verringerte Ankunftszeit des „SAP G“-Testkörpers, welchem nur eine verstärkt autogene Heilung zugeschrieben wird, würde in das Gesamtbild einer leicht verstärkten Rissverschließung passen. Eine Betrachtung der Coda für alle E2 jedoch suggeriert, dass die Wasserlagerung auch die Risszone des „REF“-Testkörpers beeinflusst. Eine Veränderung des generellen strukturellen Materialverhaltens, welches dabei über E1 charakterisiert werden soll, kann nicht eindeutig identifiziert werden. Da die Codas innerhalb der Amplitudenbilder für E2 der weiteren Betonplatten ein identisches Verhalten aufweisen und sich nicht eindeutig in jeglicher Form abgrenzt, kann über dieses Verhaltensmuster keine autonome Selbstheilung identifiziert werden.

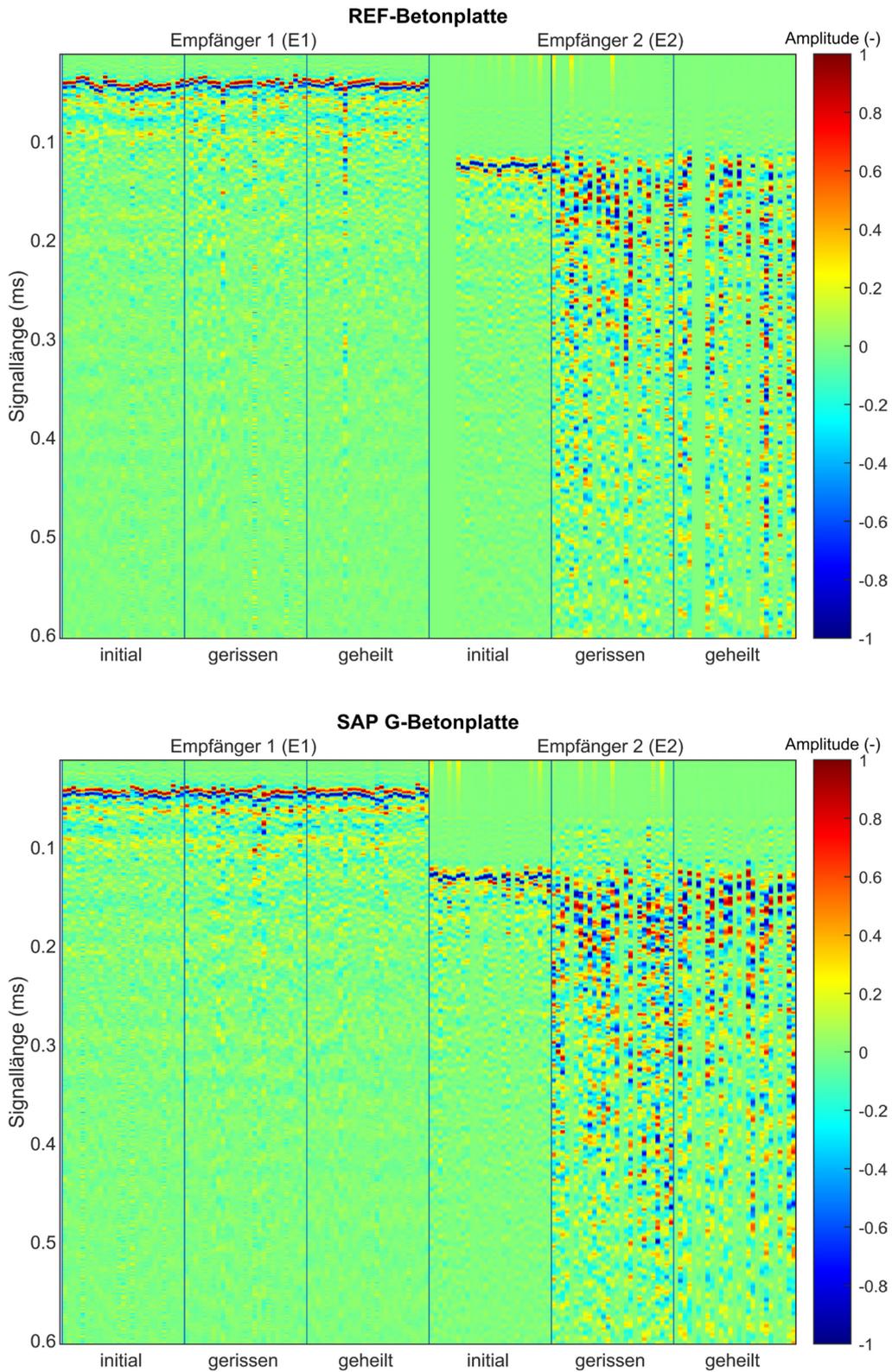


Abbildung 7-12: Zweidimensionaler Amplitudenplot der Ultraschallsignale für „REF“- und „SAP G“-Betonplatte nach Versuchsaufbau aus Abbildung 7-11 (links). Einzelsignale sind auf ihr individuelles Amplitudenmaximum normiert. Fehlerhafte Signale sind mit Leerspalten (Amplitudenwert = 0) ersetzt.

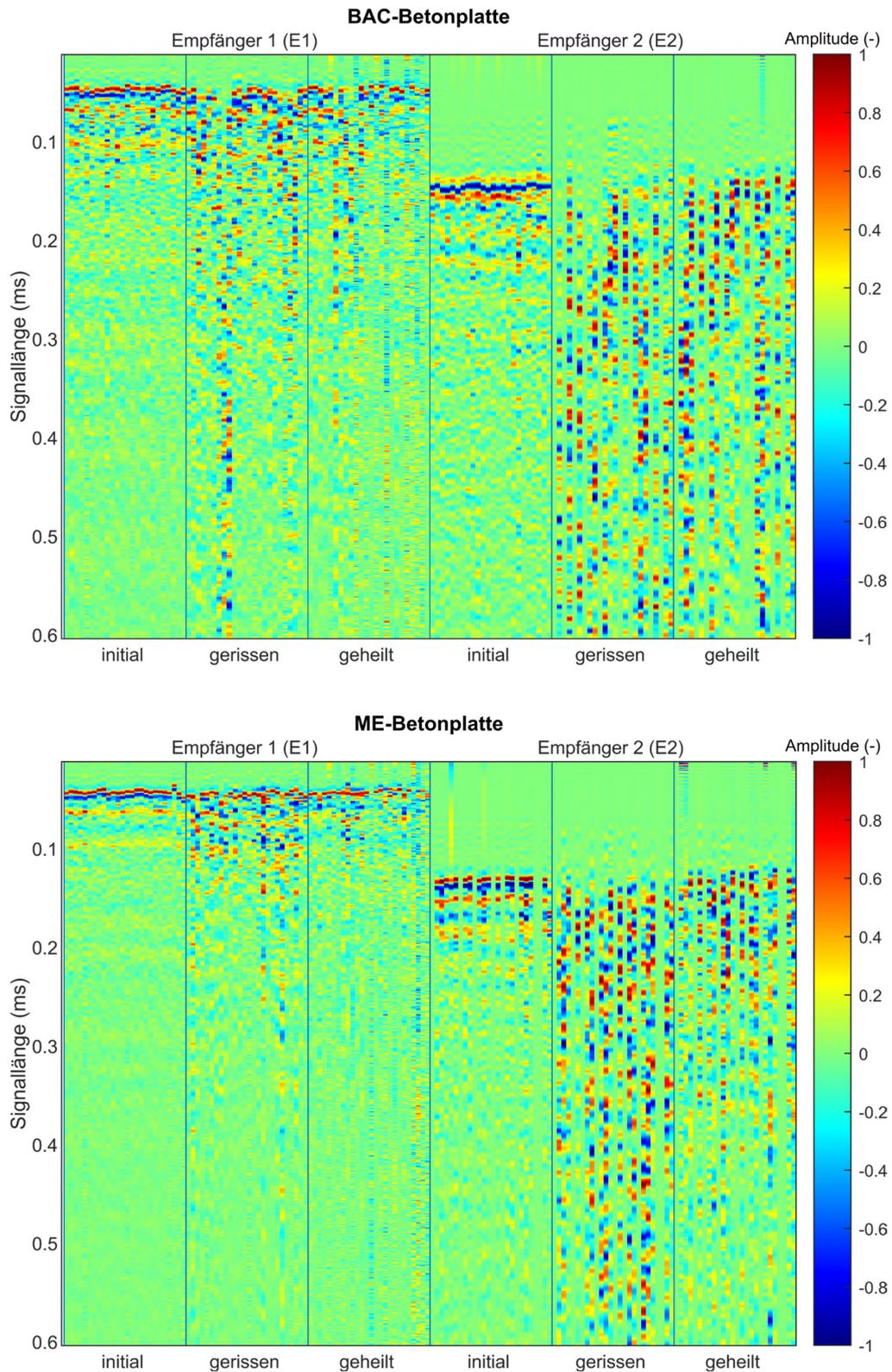


Abbildung 7-13: Zweidimensionaler Amplitudenplot der Ultraschallsignale für „BAC“- und „ME“-Betonplatte nach Versuchsaufbau aus Abbildung 7-11 (links). Einzelsignale sind auf ihr individuelles Amplitudenmaximum normiert. Fehlerhafte Signale sind mit Leerspalten (Amplitudenwert = 0) ersetzt.

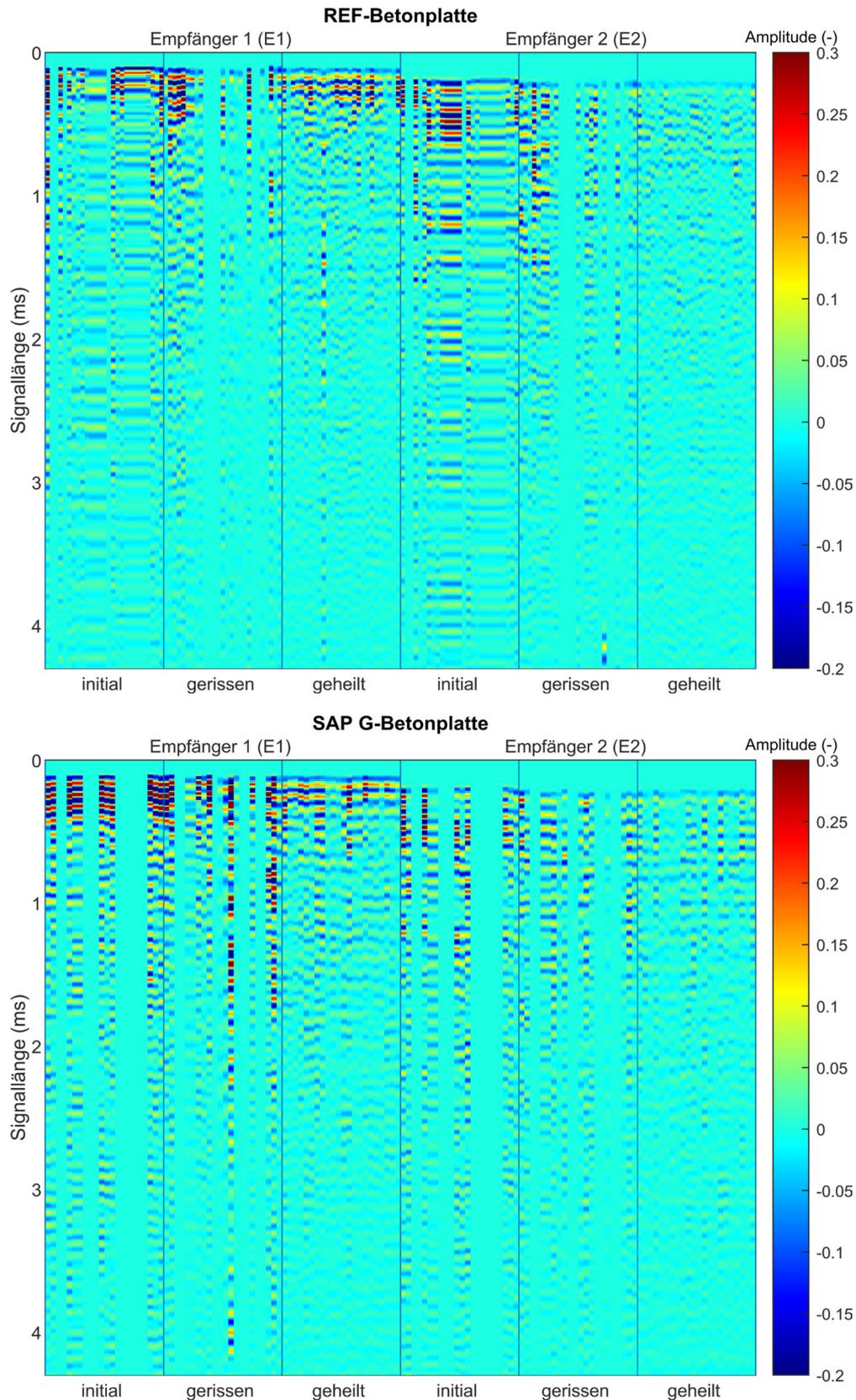


Abbildung 7-14: Zweidimensionaler Amplitudenplot der detektierten akustischen Schallwellen nach Impaktanregung für „REF“- und „SAP G“-Betonplatte. Versuchsaufbau entsprechend Abbildung 7-11 (links). Einzelsignale sind auf das Amplitudenmaximum des jeweiligen Impaktes normiert. Fehlerhafte Signale sind mit Leerspalten (Amplitudenwert = 0) ersetzt.

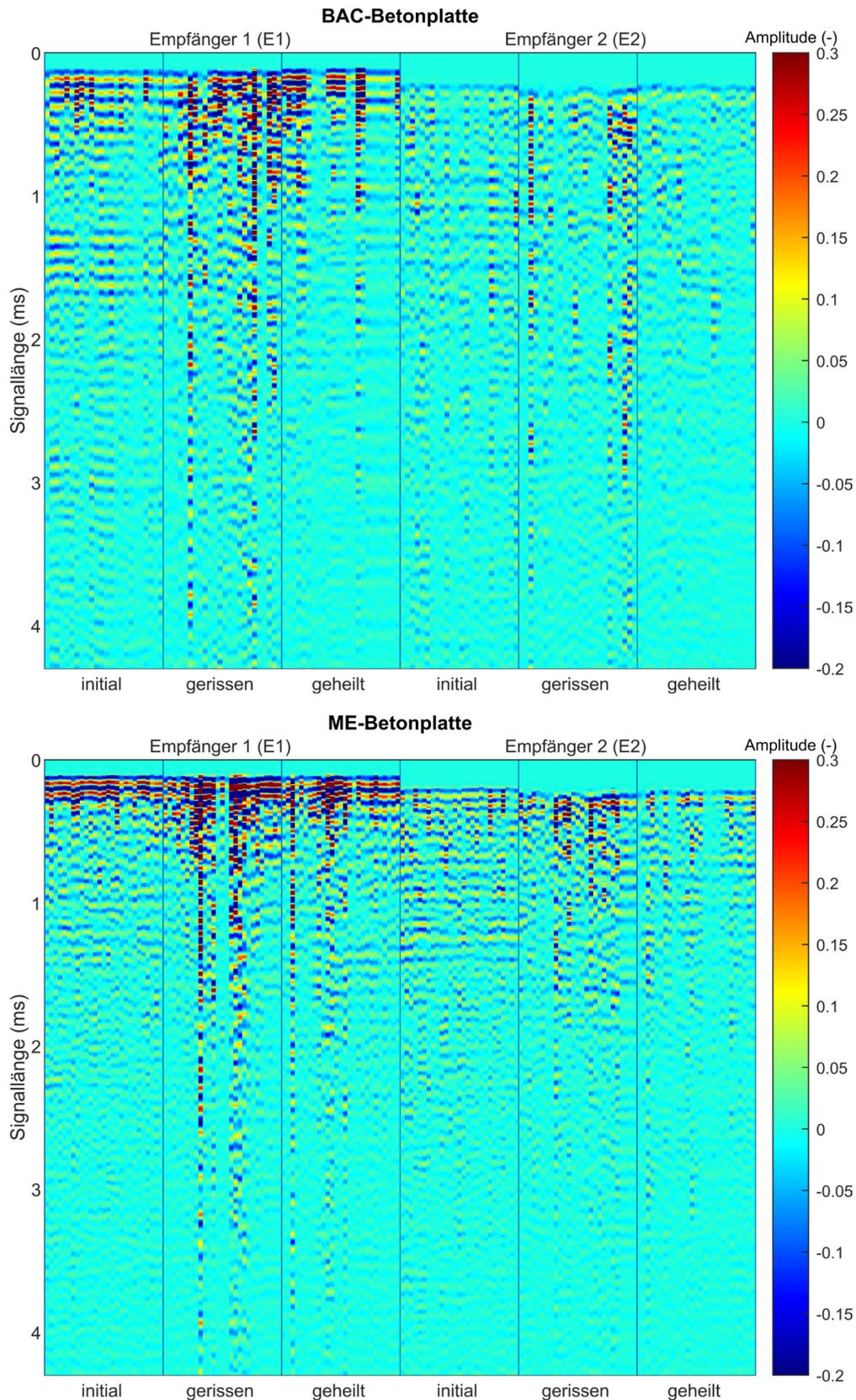


Abbildung 7-15: Zweidimensionaler Amplitudenplot der detektierten akustischen Schallwellen nach Impaktanregung für „BAC“- und „ME“-Betonplatte. Versuchsaufbau entsprechend Abbildung 7-11 (links). Einzelsignale sind auf das Amplitudenmaximum des jeweiligen Impactes normiert. Fehlerhafte Signale sind mit Leerspalten (Amplitudenwert = 0) ersetzt.

## 8 Bewertung der Verfahren und Prüftechniken

Die erzielten Resultate aus der betontechnologischen Untersuchung und die Verknüpfung mit der zerstörungsfreien Prüftechnik haben generell verdeutlicht, dass die Etablierung von Heilungsmitteln für eine verstärkte autogene und autonome Rissverschließung bzw. -Abdichtung sehr viele Herausforderungen an den Versuchsaufbau stellt.

Der Fokus dieser Arbeit lag auf der Adaption und Anwendung der zerstörungsfreien Messprüfung. Jedoch hat schon die Herstellung der Mörtelserien mit unterschiedlichen Heilungsmitteln und variierenden Dosierungen die große Varianz der mikrostrukturellen Eigenschaften aufgezeigt. Bereits zu diesem Zeitpunkt konnte über eine Berechnung des dynamischen E-Moduls eine deutliche Beeinflussung systemrelevanter Parameter nachgewiesen werden. Besteht, wie im Falle der Mörtelprüfkörper mit Liapor-Tonkugeln, die Möglichkeit Referenztestkörper herzustellen, welche die Auswirkungen der zugegebenen Heilungsmittel und Additive isoliert bemessen lässt, kann eine gezielte Optimierung durch z. B. Austausch einzelner Substrate erfolgen. Wesentlich komplizierter wird es bei der Integration von Hydrogelgranulaten in die Betonmatrix. Ohne eine Mikroverkapselungstechnik, welche den hohen Absorptionsgrad der Polymere bei der Frischbetonherstellung unterbindet, findet eine große Materialschwächung statt und verfehlt bereits mit der Festigkeitsanalyse die vergleichende Praxistauglichkeit zu Normalbeton. Damit die verstärkt rissabdichtende Wirkung gegen eindringendes Wasser und Gase evaluiert werden kann, muss ein Referenzbeton mit vergleichbaren betontechnologischen Eigenschaften vorliegen. Die notwendige Zugabe von Fließmittel, was für die Anpassung der rheologischen Parameter bzw. der Konsistenz in dieser Arbeit notwendig war, beeinflusste ebenfalls die betontechnologischen Materialeigenschaften [Mardani-Aghabaglou et al. 2013, Schulz 2003, Zhang et al. 2018].

Die Wahl und Anordnung der Bewehrung für die Mörtel- und Betontestkörper in der Mikro-, Meso- und Makro-Ebene hat sich zentral nach dem Versuchsaufbau für die 3-P-Biegeprüfung gerichtet. Ziel war, es eine möglichst gleichmäßige und homogene Rissinitiierung innerhalb einer Prüfserie zu erlangen. Dies ist einerseits förderlich für eine gleichwertige Ausgangslage der darauffolgenden Heilungsphase, andererseits lassen sich die im Vorfeld auserwählten ZFP-Verfahren zuverlässiger validieren. Während sich die CFK-Armierung für die Mörtelprismen als nahezu ideale Lösung für die zerstörende und zerstörungsfreie Evaluierung der Heilungseffizienz mit dem Polyurethan „SLV“ erwiesen hat, deuteten

die „BAC“- und „SAP“-Resultate nach der Wasserlagerung auf einen Verlust der Haftzugfestigkeit hin (Kapitel 5.1/5.3). Die Kombination aus Bewehrungsstahl und einer künstlich eingebrachten Kerbe als Sollbruchstelle führte bei den Betonbalken der Meso-Ebene zu den erwünschten Einzelrissen mit sehr ebenförmigen Rissflanken. Mit einem weiterführenden Upscaling der Testkörper (Makro-Ebene) kam es aufgrund des zunehmenden Betonquerschnitts zur Rissinitiierung mit komplexeren Rissformationen. Auch wenn dies einem praxisnäheren Schadensbild entsprach, so zeigte sich, dass die Versuchsdurchführung und -Auswertung dadurch deutlich erschwert wurde.

Die Herausforderung bei der Selektion der Prüfverfahren war ein Messkonzept zu entwickeln, welches für alle Bemessungszustände („initial“, „gerissen“, „geheilt“) kompatibel ist, den Versuchsablauf möglichst wenig behindert und Ansätze einer praxistauglichen Umsetzung offenbart. So wurden als zerstörungsfreie Messtechniken folgende Prüfverfahren in Abhängigkeit der Testkörpergeometrie, der Heilmittel und den damit verbundenen Lagerungsbedingungen während der Heilungsphase herangezogen:

- Kontakt-Ultraschall in Transmission (ToFD, in situ),
- Schwingungsanalyse,
- Schallemissionsanalyse,
- impaktbasierte akustische Transmissionsmessung.

Weitere, meist nicht-akustische Techniken, wie z. B. elektromagnetische Verfahren (Radar, Infrarot-Thermografie, Radiografie), spektroskopische Methoden (z. B. Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie) oder magnetische Ansätze (z. B. Remanenzmagnetismus) konnten aufgrund begrenzter Messgenauigkeit, Zeitintensität oder Versuchskompatibilität im Vorfeld bereits ausgeschlossen werden.

Allerdings spielt unter Berücksichtigung der physikalischen Wechselwirkungen zwischen elastischen Wellen und der Betonmatrix, die Sensorik eine weiterführende und entscheidende Rolle. Da in dieser Arbeit nur kontaktgebundene piezoakustische Wandler ohne absolute Kalibrierung eingesetzt wurden, musste weitestgehend auf eine amplitudenbasierte Datenauswertung verzichtet werden. Während die Schallemissionsanalyse ausschließlich mit Deformations- oder Reibprozessen einhergeht, und die Schwingungsanalyse maßgebend die globale Materialstruktur des vollständigen Objekts bewertet, eignete sich lediglich die Ultraschall-Transmissionsmessung für eine durchgängige Adaptierung innerhalb aller Testserien in allen Ebenen.

Im Folgenden werden die eingesetzten ZfP-Methoden hinsichtlich ihrer Validierung für eine Beurteilung der Selbstheilungseffizienz zusammenfassend beschrieben und diskutiert:

### Ultraschall

Ultraschall-Transmissionsmessungen wurden sowohl im stationären Zustand zu bestimmten Zeitpunkten als auch dauerhaft zur Überwachung des Schädigungs- und Heilungsprozesses durchgeführt. Trotz der Verwendung von Punktkontaktsensoren in Kapitel 5 hat die Ersteinsatzbestimmung der Mörtelprismen zu keiner zuverlässigen Evaluierung einer Schädigung bzw.

einer Rissverschließung geführt. Während die „SLV“-Prismen, unter Berücksichtigung der theoretischen Messgenauigkeit, keine eindeutigen Laufzeitdifferenzen aufzeigten, führte die Rissinitiierung sowie die Wasserlagerung der „BAC“- und „SAP“-Testkörper zu stark schwankenden und inkonsistenten Ergebnissen.

Jedoch konnte aus den US-Daten eine vielversprechende qualitative Analyse mittels der Centroid Time und Centroid Frequency Aufschluss über eine Schädigungsinitiierung bzw. Heilung der PU-basierten Heilung geben. Dabei zeigten die unabhängig durchgeführten in-situ als auch die stationären Ergebnisse ein in sich schlüssiges Gesamtbild für eine erfolgreiche Heilung mit dem Polyurethan „SLV“. Auch für die „BAC“ und „SAP“-Serie galt zunächst ein nach der Biegebeanspruchung beständiges Gesamtverhalten. Nach Beendigung der Wasserlagerung ergaben sich, sowohl für die ungeschädigten Referenztestkörper als auch für die gerissenen Prismen Veränderungen im gleichen Wertebereich. Die intensive Nachhydratation durch die Bewässerung scheint somit maßgeblich das energie- und frequenzbasierte Signalbild zu beeinflussen. Generell muss aber beachtet werden, dass Frequenzauswertungen sehr stark von der eingesetzten Messtechnik, im Speziellen von der Sensorcharakteristik, abhängen. Da in diesem Fall sehr breitbandige Punktkontaktsensoren (KRNB-PC) Verwendung fanden, können z. B. systembedingte Resonanzeffekte in der Frequenzanalyse vernachlässigt werden.

Liegen Laufzeitdifferenzen aufgrund von vertikalen Einzelrissen im Testkörper vor, lassen sich diese in entsprechende Risstiefen über die ToFD-Methode berechnen. Voraussetzung ist, dass der P-Wellenersteinsatz genauestens detektiert wird und keine relevanten akustischen Brücken vorliegen. So konnte bei Betontestkörpern mit dem kraftschlüssigen Präparat „MEYCO“ (Kapitel 6.1.2) sowohl die Risstiefe als auch quantitativ die Rissverfüllung ermittelt werden. Unter Verwendung des tomographischen Ansatzes in planarer Ebene hat sich zudem die Anzahl der Messpunkte fast verdoppelt. Vorteilhaft ist auch, dass sich aufgrund der überschneidenden Laufwege redundante Messwerte ergaben, aus denen sich Messabweichungen ermitteln lassen. Dabei hat sich gezeigt, dass mit zunehmender Stärke des PU-Haftverbundes bzw. der PU-Grenzschicht die Messgenauigkeit zunimmt. Jedoch ließ sich aufgrund der einseitigen Sensorankopplung mit dieser Methode immer nur der oberste Verbund detektieren. Folgte darunter ein weiterer Hohlraum, war dieser nicht ersichtlich. Ähnliches gilt für Lücken zwischen partiellen Verbundstellen. Ist der horizontale Abstand dabei geringer als die Risstiefe, lässt sich diese, bedingt durch die sphärische Wellenausbreitung, nicht detektieren. Risstiefenbestimmungen innerhalb der Betontestserie mit dem sehr niedrigviskosen „SLV“ haben nach der Rissinitiierung nicht die eigentlichen Tiefen der Rissspitzen wiedergegeben. Grund hierfür war die sofortige Verfüllung der Risszonen nach Freisetzung des PUs bereits während des 3-P-Biegeversuchs. Dieses Verhalten konnte mit einer manuellen Rissverfüllung in situ nachgewiesen und bestätigt werden (Kapitel 6.2.3). Problematisch jedoch ist, dass geringe Risstiefen von nur wenigen Samedifferenzen der Signalankunftszeiten abhängen. Maßgebender Einflussfaktor ist dabei nicht die Abtastrate (Sampling rate), sondern die Signalanfangsfrequenz, welche die Steilheit des Ersteinsatzes bestimmt. In Kombination mit Signalveränderungen durch Impedanzeffekte, aufgrund des Übergangs Beton → PU → Beton, konnte die vollständige Rissverschließung nicht mit dem ToFD-Verfahren nachgewiesen werden.

Das in-situ Monitoring offenbarte einen vielversprechenden Ansatz zur Charakterisierung des Verfüll- und Aushärteprozesses von reaktiven Polyurethanen. Da für die Analyse nur die relativen Signalveränderungen entscheidend waren, ließen sich mit Hilfe des Korrelationskoeffizienten minimalste Veränderungen detektieren. Ob sich dieser Ansatz auf eine Selbstheilung mit Mikrokapseln und komplexen Rissfaktoren zukünftig übertragen lässt bzw. welche Auswerteparameter letztlich die entscheidenden (chemischen) Heilungsprozesse abbilden, sollte Gegenstand weiterführender Studien sein. Ebenso fraglich ist, ob ein Monitoring von Selbstheilungsprozessen mit z. B. eingebetteten oder fest fixierten piezoakustischen Wandlern ein rentables Werkzeug für eine quantitative Bestimmung der Selbstheilungseffizienz ist. Durch die hohen Anforderungen an das Messequipment, die limitierte Reichweite akustischer Schallwellen im höheren US-Frequenzbereich, sowie die hohe Störanfälligkeit durch z. B. elektromagnetische Störungen bleibt diese Auswertetechnik aktuell noch auf den Forschungsbereich beschränkt. Hochspezialisierte Handgeräte wie beispielsweise das „MIRA A1040“ (ACS-Solutions GmbH) sind zwar für eine praxistaugliche und oberflächenbasierte US-Untersuchung geeignet, liefern aber für eine 3D-Detektion von oberflächennahen Mikrorissen noch nicht die notwendige Auflösung.

Während die Betontestkörper der Meso-Ebene die Rissöffnung über eine plastische Verformung der Bewehrung erreichten, musste bei den Biegebalken der Makro-Ebene (Kapitel 7.1) eine Rückverformung mit Hilfe von Reparaturmörtel aktiv verhindert werden. Dieses Rissinitiierungskonzept hat sich zwar als zuverlässig und kontrollierbar eruiert, schränkte aber aufgrund des künstlichen Verbundes der Rissflanken den zur Verfügung stehenden Querschnitt für die US-Transmissionsmessungen ein. Im Vergleich zu einzelnen gezogenen Bohrkernen, wurden, trotz manueller Ersteinsatzbestimmung, die ermittelten Risstiefen unterschätzt. Da bereits an der Oberfläche teilweise Rissverästelungen ersichtlich waren, ist anzunehmen, dass sich zahlreiche akustische Brücken in der Risszone gebildet haben. Eine bakterienbasierte Selbstheilung konnte, in Bezug zum Referenztestkörper, über eine Datenauswertung der US-Daten nicht festgestellt werden. Eine Rissverschließung wurde über Dünnschliffproben an partiellen Entnahmestellen ebenfalls nicht bestätigt. Aufgrund der Bewässerungstechnik in Form eines Wasserflusses entlang der Bauteiloberfläche fand auch ein Sedimenttransport von feinsten Sandpartikeln statt. Dieser Prozess beeinflusste maßgebend eine mechanische Rissverfüllung (Kapitel 2.1) und war in Kombination mit den autogenen Heilungsprozessen des relativ jungen Betons (starke Calcit ausfällungen an den oberflächlichen Risskanten) vermutlich ausschlaggebender Faktor für den signifikanten Rückgang der ermittelten Risstiefen.

Trotz rauer und teilweise unebener Oberflächen der Betonplatten hat die Applizierung von US-Kontaktsensoren mit einer anschließenden Datenauswertung über einen normierten 2D-Amplitudenplot in Kapitel 7.2.2 gezeigt, dass sich unterschiedliche Schädigungsinitiierungen (durchgängige/nicht-durchgängige Risse) quantitativ in der Signalform über die Coda detektieren lassen. Auch wenn über zusätzliche Permeabilitätstests keine Selbstheilungseffekte verifiziert werden konnten, so zeigte sich gegenläufig zum Referenztestkörper im Amplitudenbild des „SAP G“, „ME“ und „BAC“-Testkörpers, Indizien für eine rissverschließende Wirkung. Dass diese Erscheinungen nicht aus einer veränderten Betonmatrix im ungeschädigten Bereich oder aus dem natürlichen autogenen Heilungseffekt resultieren, konnte mit Hilfe der vorgelagerten Referenzsensoren nachgewiesen werden.

Um die ungerichtete Schallinduzierung aufgrund der indirekten Transmissionsmessungen zu kompensieren, wurden für einen erhöhten Schalleintrag und einer reproduzierbaren Sensorankopplung bei allen Testkörpern die Beton- bzw. Mörteloberfläche mit dauerhaft beständigem Epoxidharz partiell oder vollständig beschichtet. Im Falle der „SLV“-Betontestkörper musste aufgrund eines mangelhaften Betonagevorgangs zudem eine mehrere Zentimeter dicke Schicht vollständig abgesägt werden. Diese Präparationen sind in der Praxis an bestehenden Bauwerken schwierig bzw. kaum realisierbar. Die Verwendung von Oberflächenwellen (kontaktgebunden bzw. auch kontaktfrei) zur quantitativen Mikrorissdetektierung bzw. auch zur Rissverschließung ist, im Gegensatz zur P-Wellendetektion, meist noch sehr ungenau und nur mit vorangegangenen Kalibrierungstests aussagekräftig [Aggelis et al. 2007, Shiotani et al. 2007].

### Schwingungsanalyse

Über die Bestimmung der Resonanzfrequenzen ließen sich die betontechnologischen Materialveränderungen der variierenden Mörtelrezepturen quantitativ erfassen. Die Charakterisierung der Veränderungen infolge der Schädigungsinitiierungen bzw. der darauffolgenden Lagerungsbedingungen erfolgte infolge der eingebrachten Bewehrung sowohl für die Mörtel als auch für die Betontestkörper relativ über die Resonanzfrequenzen.

Neben dem großen Vorteil, dass die individuellen Prüfkörper aufgrund der rückstandsfreien Sensorankopplung unversehrt blieben und für Folgemessungen zur Verfügung standen, zeigte die Resonanzfrequenzbestimmung eine sehr hohe Reproduzierbarkeit auf. Die Mörtel- und Betontestkörper mit „SLV“ (Kapitel 5.3/6.2.4) sowie „MEYCO“ (Kapitel 6.1.4) wiesen, in Abhängigkeit der Anregungsmoden, eine konsistente Korrelation zwischen der Selbstheilungseffizienz (SHE) und der Zunahme der kraftschlüssigen Verbundfläche auf. Die Einbringung und spezifische Anordnung der Bewehrung führte zu einem inhomogenen Schwingungsverhalten, was demzufolge in unterschiedlichen SHE-Verhältnissen resultierte. Folglich gilt gleiches für eine Gegenüberstellung zu den ermittelten quasistatischen maximalen Wiederbelastungswerten aus dem 3-P-Biegeversuch. Das Schwingungsverhalten der „BAC“- und „SAP“-Mörtelprismen wurde maßgebend von globalen Strukturveränderungen (z. B. Nachhydratation) durch die Wasserlagerung beeinflusst. Ähnlich der US-Resultate war eine Differenzierung sowohl zwischen ungeschädigten Referenzprismen als auch zwischen den variierenden Dosierungen an Heilmitteln nach Abschluss der Heilungsphase nicht möglich. Davon unberührt blieb die zusätzlich zur Resonanzfrequenz ermittelte Dämpfungscharakteristik, berechnet über die Half-Power-Width. Nach der Wasserlagerung blieben die Dämpfungswerte für die Referenztestkörper nahezu stabil. Auch wenn mit der Rissinitiierung die Signaldämpfung sowie die Standardabweichungen zunahmen, blieben die gerissenen Testkörper nach der Heilungsphase ebenfalls nahezu unverändert. Dass sich mit dieser Methode jedoch ein kraftschlüssiger Verbund identifizieren lässt, zeigten die manuell geheilten „SLV“-Mörteltestkörper. Ob es bei den anderen Heilmittelkonzepten dennoch zu einer verstärkt abdichtenden Rissverschließung kam, lässt sich mit dieser Auswertung nicht nachvollziehen. Entsprechende Anzeichen konnten auch mit den betontechnologischen Untersuchungen (Kapitel 5.1) nicht gefunden werden.

Die Schwingungsanalyse hat sich als zuverlässiges und schnell zu installierendes Werkzeug einer kraftschlüssigen Rissverschließung herauskristallisiert. Es ist anzunehmen, dass sich für eine Evaluierung der Selbstheilungseigenschaften die Anwendbarkeit auf Testkörper im Labormaßstab beschränkt. Maßgebender Einflussfaktor ist dabei die notwendige Bewehrung, welche bei zunehmender Objektdimensionierung mit ansteigt und das Schwingungsverhalten dementsprechend dominiert. Die Auflösung einer quantitativen bzw. qualitativen Analyse wird folglich reduziert. Dieser Effekt konnte bereits bei der Auswertung der 1. Oberschwingung (Kapitel 6.1.4) detektiert werden. Für rein homogene Werkstoffe eignete sich die Bestimmung der Resonanzfrequenz oder auch weiterführender Auswerteparameter (z. B. Dämpfungsfaktor) für eine Differenzierung der betontechnologischen Eigenschaften variierender Rezepturen. Somit lässt sich dieses Potential für eine Materialoptimierung zementgebundener Werkstoffe mit eingebrachten Selbstheilungseigenschaften nutzen.

### Schallemissionsanalyse

Da akustische Schallemissionen nur bei mechanischen Deformationen und Reibprozessen auftreten, wurde die SEA lediglich bei den ausreichend großen Testkörpern in der Meso-Ebene (Kapitel 6) mit kraftschlüssigen Heilmitteln („MEYCO“/„SLV“) eingesetzt. Dabei konnte aufgrund der hohen Anzahl an SE-Sensoren sowie einer vorherigen Bestimmung der Lokalisierungsgenauigkeit eine zuverlässige 3D-Lokalisierung einzelner Schädigungsmechanismen erfolgen. Auch wenn eine absolute Sensorkalibrierung nicht vorlag, ließen sich über eine relative Energiebetrachtung Kapillarbrüche von einer Betonmatrixschädigung unterscheiden und über eine anschließende Lokalisierung nachweislich zuordnen. Die größte Herausforderung innerhalb der Lokalisierungsalgorithmen besteht allgemein in der Quantifizierung der (Un-) Genauigkeit sowie der Identifikation von Messausreißern. Diese sind bei zementgebundenen Werkstoffen aufgrund des komplexen Streuungsregimes stark ausgeprägt. Liegen die Quellherde, wie z.B. die Glaskapillaren sehr dicht beieinander, wird die inverse Lösung häufig von einer großen Standardabweichung begleitet, welche eine zuverlässige Differenzierung der Hypozentren unterbindet.

Bei dem verhältnismäßig viskosen „MEYCO“ hat sich gezeigt, dass bei erstmaliger Belastung eine Triggerung von (Glaskapillar-) Brüchen nicht automatisch mit einer Aktivierung bzw. Freisetzung des Heilmittels einhergeht. Ob die Aktivierung erfolgreich war, konnte jedoch mit der wiederholten Biegeprüfung detektiert werden. Dabei wurden hauptsächlich SE-Events registriert, welche auf das spröde Versagen des ausgehärteten „MEYCO“-Schaums der eingebetteten Kapillarenpaare zurückzuführen waren. Generell spiegelten die Lokalisierungsergebnisse die individuellen PU-Verfüllungen innerhalb der Risszone wieder. Dies verdeutlicht auch eine kombinierte Betrachtung mit den Ergebnissen aus der Ultraschall ToFD-Messung, exemplarisch für „MEYCO III“ in Abbildung 8-1 dargestellt. Die visuelle Betrachtung der zeitlichen Lokalisierungsergebnisse (Abbildung 0-10, Video 1) hat zudem verdeutlicht, dass das Auflösen des kraftschlüssigen Verbundes, infolge einer wiederholten Biegebeanspruchung, nicht dem klassischen Rissöffnungsschema „von unten nach oben“ erfolgt. Diese Erkenntnis ist besonders für eine Betrachtung hinsichtlich (Wasser-) Dichtigkeit relevant.

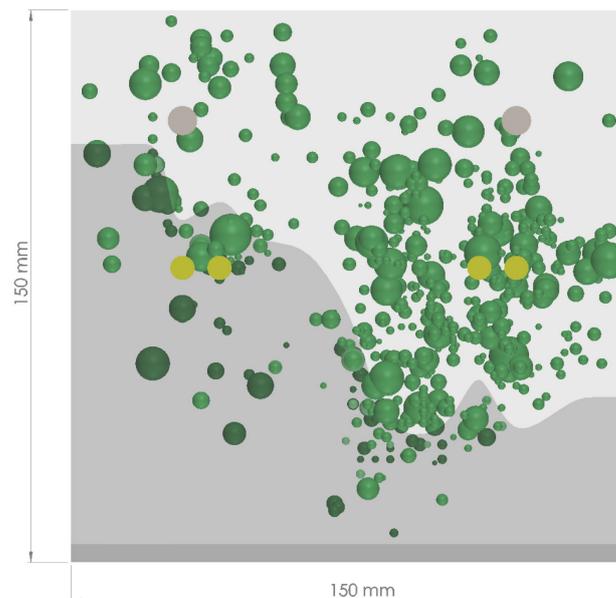


Abbildung 8-1: Kombinierte Betrachtung der Ergebnisse aus ToFD-Verfahren und Schallemissionsanalyse nach bzw. während wiederkehrender Belastung. 3D-CAD Darstellung<sup>33</sup> zeigt Querschnitt von „MEYCO III“ mit oberliegender Bewehrung (grau), zwei Paar Glaskapillaren (gelb), SE-Events (grün, Größe der Events ist energieabhängig) sowie die Grenzfläche aus der Risstiefenbestimmung. Die Grenzfläche der unterschiedlich grauen Flächen stellt dabei den detektierten Verbund mit PU dar.

Eine rein parameterbasierte Auswertung bzw. Clusterung der Events, wie sie häufig in der Literatur zu finden ist, ermöglichte keine frakturspezifische Zuordnung. Problematisch bei dieser parameterbasierten Auswertung ist generell, dass sich die Datenanalyse einzelner Events auf die eingestellte Signalaufzeichnungslänge beschränkt. Somit besteht immer die Gefahr, dass energiereiche bzw. langanhaltende Wellen vorzeitig abgeschnitten werden und nicht den eigentlichen Charakter widerspiegeln. Gleiches gilt für geklippte Signale.

Für die Testkörper mit dem elastischen und sehr viskosen „SLV“ wurden deutlich weniger SE aufgezeichnet und auch folglich lokalisiert. Auch wenn der Versuchsaufbau und die Testkörpergeometrie nicht vollständig dem der „MEYCO“-Testkörper entsprach, so ergaben sich nach einer Kalibrierung die identischen Triggereinstellungen. Daraus kann abgeleitet werden, dass das duktile Ablöseverhalten des „SLV“ von den Rissflanken einerseits insgesamt weniger Events ausgelöst hat und andererseits Schallemissionen mit einer abweichenden Signalcharakteristik emittierte.

Allgemein hat sich gezeigt, dass die Anzahl der aufgezeichneten Events, trotz meist durchwegs identischen Versuchseinstellungen innerhalb einer Testserie, starken Schwankungen unterliegt. Aufgrund der langen und komplexen Messkette innerhalb der SEA existieren zahlreiche Stellschrauben, welche das Ergebnis signifikant beeinflussen können. Die Untersuchung der zwei verschiedenen PU-basierten Heilmitteln verdeutlichte ebenfalls, dass sich z. B. parameterbasierte Signalmuster von

<sup>33</sup> erzeugt mit SolidWorks (Dassault Systèmes)

spezifischen Ereignissen (Kapselbrüche etc.) nicht auf weiterführende bzw. auch wiederholende Versuchsdurchführungen übertragen lassen. Einen starken Einfluss hat dabei die Emissionsquelle sowie der Laufweg der akustischen Schallwelle. Wird der Testkörper erstmalig (initial) belastet oder liegt hauptsächlich ein Einzelriss - wie in dieser Arbeit - vor, so wird der Schalllaufweg zum Empfangssensor während der vollständigen Versuchsdauer kaum gestört. Bei multiplen Rissstrukturen, z. B. bei 4-P-Biegeversuchen, kann der Signallaufweg während der Versuchsdurchführung mehrfach unterbrochen werden, sodass eine gleichmäßige und umfassende Sensorabdeckung erforderlich ist und hohe analytische Anforderungen an das Postprocessing stellen. Generell kann geschlussfolgert werden, dass aufgrund der komplexen Wechselwirkung der akustischen Welle mit der Betonmatrix, erst mittels einer Lokalisierung sowie einer Abschätzung der dazugehörigen Genauigkeit eine aussagekräftige Evaluierung unterschiedlicher Bruchprozesse gewährleistet wird. Darauf aufbauend lässt sich die Schallemissionsanalyse vielfältig mit weiteren zerstörungsfreien Prüftechniken, wie z. B. dem ToFD-Verfahren oder DIC kombinieren.

### Impaktbasierte Oberflächenwellenmessung

Um den Energieeintrag der Schallwelle zu erhöhen und gleichzeitig ein schnell zu installierendes Messsystem mit reproduzierbarer Datenauswertung zu erhalten, wurde der US-Versuchsaufbau aus Kapitel 7.1.2 bzw. 7.2.2 mit den Messkomponenten der Schwingungsanalyse durchgeführt. Die Signalanalyse suggerierte eine Oberflächenwellenanregung mit der sich nicht-durchgängige als auch durchgängige Mikrorisse zwischen 200-700  $\mu\text{m}$  detektieren ließen. Identisch zu den parallel durchgeführten US-Messungen war eine qualitative Unterscheidung der initiierten Rissweiten nicht möglich. Allerdings bildeten sich deutlichere und homogener verteilte Amplitudenmuster, welche nicht nur im Signalanfangsbereich, sondern auch in der Coda ein differenzierbares Gesamtbild ergaben. Da die Wellenausbreitung der tieffrequenteren Rayleigh-Welle verstärkt sensitiv auf Schereffekten reagiert, werden Einflüsse z. B. der Bewehrung, deutlicher vernachlässigt. Dies schließt allerdings auch einzelne kontaktbindende Partikel, wie z. B. aus der autonomen Rissverschließung, ein. Kommt es jedoch zu globalen strukturellen Materialveränderungen, wie z. B. durch die Wasserlagerung, lassen sich diese aufgrund des dispersiven Wellenverhaltens detektieren [Soltani et al. 2013]. Während die Amplitudennormierung mit Hilfe des kraftkontrollierten Impaktes keinen offensichtlichen Mehrwert bildete, zeigte sich mit dem rückläufigen Zeitversatz der Signalwellenfront der Testkörper mit durchgängigen Rissen („BAC“/„ME“) ein verstärkter Ansatz einer autonomen Rissverschließung. Da die Ausgangsbedingungen des Referenztestkörpers aufgrund der nicht-durchgängigen Rissformation keinen direkten Vergleich zu einem reinen autogenen Heilungseffekt bieten, ist eine verlässliche Aussage über eine autonome Selbstheilung nicht möglich.

Aus dem direkten Vergleich zwischen dem auf Ultraschall basierten Versuchsaufbau und dem Proof-of-Concept mit einer impaktangeregten Schallausbreitung sowie einer Signalerfassung über schnell ankoppelbare piezoelektrische Beschleunigungssensoren kann geschlussfolgert werden, dass beide Systeme ihre Vor- und Nachteile haben. Zum einen sind hochfrequente Frequenzen notwendig um eine möglichst detaillierte Auflösung interner Fehler zu erhalten, zum anderen kann eine zu hohe Anzahl an irrelevanten Rückstreuern das Gesamtbild trüben. Für niedrige Frequenzen bzw. in Kombination mit der

spezifischen Rayleigh-Wellenanregung gilt genau der umgekehrte Fall. Folglich werden entscheidende Heilungseffekte in der Mikroebene übersehen. Beide Versuchsmodelle haben gemein, dass die Fehleranfälligkeit mit der Kontaktankopplung der Sensoren stark ansteigt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Erstellung von Amplitudenmustern über eine zweidimensionale Signalbetrachtung ein vielversprechendes Monitoringkonzept für eine Rissschädigung sowie autonome Selbstheilungseffekte sein kann. Da sich aus den Abbildungen keine quantitativen Schlussfolgerungen ablesen lassen, sind für eine Evaluierung aktuell immer noch zusätzliche (zerstörende) Referenzverfahren zwingend notwendig. Um letztlich einen möglichst praktikablen und flexibel einsetzbaren Versuchsaufbau mit einer zuverlässigen Datenanalyse zu erhalten, ist es essentiell, die Anregung als auch den Empfang der propagierenden Schallwelle kontaktfrei zu gestalten. Einen vielversprechenden Ansatz zeigt z. B. Choi et al. (2015), der in Kombination mit dem bereits etablierten SAFT-Rekonstruktionsalgorithmen und einem hybriden Ankopplungsansatz eine deutliche Verbesserung der Auflösung erzielte. Um vorab die notwendigen Rahmenbedingungen zu ermitteln, lassen sich immer aufwendigere Wellenausbreitungsszenarien mit zunehmend verlässlicheren numerischen Simulationen einsetzen [Masserey et al. 2005, Wang et al. 2018, Yuan et al. 2015].



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Um zementgebundene Werkstoffe nachhaltiger und dauerhafter zu gestalten, wurden und werden von Forschern und Wissenschaftlern zahlreiche Selbstheilungsmechanismen entwickelt, welche die rissgeschädigten Strukturen wieder abdichten oder auch kraftschlüssig verschließen sollen. Eine selektive Auswahl an unterschiedlichen Heilungsmechanismen wurde im Rahmen dieser Arbeit in drei verschiedenskaligen Testkörperserien (Mörtelprismen, Betontestkörper, Betonbalken/-Platten) integriert und bewertet. Dabei lag der Fokus auf der Konzeptionierung eines Versuchsaufbaus, welcher es ermöglichte, den umfassenden Vorgang vom ungeschädigten Testkörper bis hin zum abgeschlossenen Vorgang nach der Heilungsphase zu überwachen und zu charakterisieren. Dies galt sowohl für die Entwicklung des neuartigen Werkstoffs im Labor als auch für die Evaluierung der Effizienz an realen Bauteilstrukturen. Für die Bestimmung der Materialeigenschaften bzw. der Heilungseffizienz von

- Bakteriensporen der Gattung *Bacillus*, imprägniert in Blähtonkugeln („BAC“),
- Bakteriensporen der Spezies *Bacillus sphaericus*, mikroverkapselt in Melamin-Formaldehyd („ME“),
- ureolytischen Mischkulturen, pulverartige Mikroverkapselung („MUC“),
- kommerziellem und unverkapseltem Hydrogelgranulat („SAP“) sowie modifiziertem („SAP G“),
- Polyurethanen (PUs), verkapselt in Glaskapillaren sowie manuellen Injektion („MEYCO“/„SLV“)

wurden folgende zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt:

- Schwingungsanalyse
- Ultraschall in Transmission
- Schallemissionsanalyse
- impaktbasierte Oberflächenwellenmessung

Die Untersuchung von Mörtelprismen mit „BAC“- , „SAP“- und „SLV“-Heilmittel umfasste, neben der Beurteilung der Selbstheilungseffizienz, auch eine Charakterisierung der veränderten betontechnologischen Eigenschaften des Frischmörtels im erhärteten Zustand sowie beeinflusst durch

eine langfristige Wassereexposition. Parallel zur standardisierten Druckfestigkeitsprüfung ließ sich mittels der Schwingungsanalyse der dynamische E-Modul für variierende Heilmitteldosierungen zuverlässig detektieren. Während die Hinzugabe von zusätzlichem Anmachwasser maßgeblich die Fließgrenze beeinflusste, bewirkte eine erhöhte Dosierung an Hydrogelgranulat bzw. imprägnierten Blähtonkugeln eine verstärkte Reduzierung des dynamischen E-Moduls. Unter Berücksichtigung der Abweichungen der kontrollierten Rissweiteninitiierung und autogener Materialveränderungen während der zyklischen Wasserlagerung, was eine beschleunigte Simulation der Umwelteinwirkungen suggeriert, konnte keine Messmethode eine zuverlässige Evaluierung für eine autonome Rissverschließung liefern. Dies umfasste sowohl betontechnologische Analysen als auch unterschiedliche Auswerteparameter der akustischen Prüfverfahren. Bedingt durch eine manuelle Injektion des PUs „SLV“ führte der kraftschlüssige Flankenverbund bei Testkörpern mit einer gänzlichen Rissverfüllung während der Wiederbelastung zu einer Überschreitung der Maximalbelastungswerte des initialen 3-P-Biegeversuchs. Dieser Überanstieg spiegelte sich jedoch nicht in den zerstörungsfreien Messdaten wider. Dennoch korrelierten die aus den Resonanzfrequenzen bestimmten Selbstheilungseffizienzen (SHE) mit dem relativen Verfüllgrad der einzelnen Testobjekte.

Bei der Verwendung von Betontestkörpern ( $550 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3 / 400 \times 150 \times 100 \text{ mm}^3$ ) mit einbetonierten Glaskapillaren, gefüllt mit „SLV“ bzw. „MEYCO“, konnte über die Laufzeitdifferenzen der P-Wellen eine quantitative Risstiefenbestimmung mittels ToFD-Verfahren vor und nach der Heilungsphase erfolgen. Trotz schaumartiger Struktur bildete der neuartige Verbund eine akustische Brücke, sodass die Verfüllgrenze formgetreu abgebildet werden konnte. Da die Rissverfüllung bei dem sehr niedrigviskosen „SLV“ unverzüglich nach der Aktivierung während des Biegeversuchs einsetzte, war es ausschließlich mit einer In-situ-Ultraschallmessung möglich, den Verfüll- und Aushärtprozess von Beginn an zu erfassen und über den Korrelationskoeffizientenverlauf zu interpretieren. Die parallel zur Biegeprüfung angewandte qualitative Schallemissionsanalyse detektierte den zeitlichen Ablauf der Schadensentwicklung des initialen wie auch des geheilten Testkörpers. Während der initialen 3-P-Biegeprüfung führte die Selektierung der Schallemissionen (SE) über die Energie zu einer Differenzierung zwischen Emissionen, bedingt durch eine Schädigung der Betonmatrix und der eingebrachten Glaskapillarenbrüche. Eine anschließende Lokalisierung bestätigte die zunächst quantitative Auswertung. Das Emittieren von Emissionen aus dem Bruchprozess des geheilten Testkörpers hängt sehr stark von der Tragfähigkeit des Verbundes sowie von der Sprödigkeit bzw. Duktilität des PUs ab. So konnte die Verteilung des PUs „MEYCO“ nahezu vollständig über eine Lokalisierung der SE-Events detektiert werden. Für das duktilere „SLV“, welches sich flächendeckend ausbreitete, wurden hingegen nur sehr wenige Emissionen aufgezeichnet.

Die individuellen Schädigungskonzepte sowie die eingeschränkten mobilen Lagerungsbedingungen der strukturähnlichen Bauteilelemente (Betonbalken/-platten) limitierte die Anzahl an Prüfverfahren und forderte eine angepasste Mess- und Analysemethodik. Biegeeinzerrisse mit definierten Rissweiten, initiiert über eine manuelle 3-P-Biegeprüfung innerhalb der Testserie mit Betonbalken, suggerierten mit dem ToFD-Verfahren mit zunehmender Rissweite (400-600  $\mu\text{m}$ ) auch eine zunehmende Risstiefe. Dies galt sowohl für einen Referenztestkörper als auch für einen Betonbalken mit „MUC“. Die berechneten Ergebnisse lagen jedoch meist unter den ermittelten Werten aus partiell entnommenen Bohrkernproben. Im Gegensatz zur vollständigen Unterwasserlagerung der Mörtelprismen, bestand die 4-wöchige

Heilungsphase aus einer künstlichen periodischen Beregnung, welche einen Wasserfluss an der gerissenen Oberfläche produzierte. Die im Anschluss erzeugten Dünnschliffproben deuteten lediglich auf dünne Calcitablagerungen an den Rissflanken beider Objekte hin. Die deutliche aber unspezifische Reduzierung der ermittelten Risstiefen wurde zudem durch mechanische Rissverschließungen, resultierend aus einem Sedimenttransport, begünstigt. Eine Evaluierung der Selbstheilungseffizienz der Betonplatten-Serie wurde durch die ungleichmäßige Rissinitiierung mittels Einschlagkeile erschwert. Die sehr komplexen und unterschiedlichen Rissformationen entlang der rauen und unebenen Plattenoberflächen führten mit dem mobilen und vereinfachten Messaufbau mit US-Sensoren zu einem inhomogenen Amplitudenmuster mit sehr ungleichmäßigen Wellenformen, das im geheilten Zustand leichte Veränderungen aufwies. Die deutlich tieffrequentere aber amplitudenstarke Oberflächenwellenanregung suggerierte dagegen über alle Messpunkte einen einheitlichen Zeitversatz der Signalwellenfront nach der Rissinitiierung und einem inversen Trend nach Ende der statischen Wasserbeaufschlagung.

Die dargestellten Versuchsdurchführungen und Auswertungen haben gezeigt, dass zerstörungsfreie Prüfverfahren das Potential besitzen, die neuentwickelten Werkstoffe zu charakterisieren und versuchsrelevante Veränderungen zu detektieren. Auch wenn mit der eingesetzten Messtechnik und der limitierten Anzahl an Testkörpern nur eine quantitative Evaluierung der PU-basierten Selbstheilung zuverlässig war, so lieferten die gewählten Auswerteparameter die notwendigen Voraussetzungen für zukünftige Forschungsvorhaben. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Ergebnisse nur jeweils die Resultate eines einzigen von unzähligen individuellen Messaufbauten widerspiegelten. Um die explorative Datenanalyse zu optimieren, müssen die Messinstrumente und Versuchsdurchführungen gezielter und effizienter auf die zahlreichen Randbedingungen abgestimmt werden. Ähnlich der Designoptimierung von Mikroverkapselungen [Savija et al. 2015, Šavija et al. 2016] würden numerische Modellierungen als unterstützendes Werkzeug für die zerstörungsfreie Prüfung förderlich sein.



---

## Referenzen

- Abd Elmoaty, Abd Elmoaty M. (2011):** *Self-healing of polymer modified concrete*. Alexandria Engineering Journal, Vol. 50, pp. 171-178
- Aggelis, D. G.; Shiotani, T. (2007):** *Repair evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements*. Cement and Concrete Composites, Vol. 29, pp. 700-711
- Aguilar, Rafael; Ramírez, Eduardo; Haach, Vladimir G.; Pando, Miguel A. (2016):** *Vibration-based nondestructive testing as a practical tool for rapid concrete quality control*. Construction and Building Materials, Vol. 104, pp. 181-190
- Ahn, Eunjong; Kim, Hyunjun; Sim, Sung-Han; Shin, Sung Woo, et al. (2017):** *Principles and Applications of Ultrasonic-Based Nondestructive Methods for Self-Healing in Cementitious Materials*. Materials, Vol. 10, pp. 278
- Akaike, H. (1974):** *A new look at the statistical model identification*. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 19, pp. 716-723
- Aki, Keiiti; Chouet, B. (1975):** *Origin of Coda Waves: source, attenuation and scattering effects*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 80, pp. 3322-3342
- Aleshin, Vladislav; Delrue, Steven; Trifonov, Andrey; Bou Matar, Olivier, et al. (2018):** *Two dimensional modeling of elastic wave propagation in solids containing cracks with rough surfaces and friction – Part I: Theoretical background*. Ultrasonics, Vol. 82, pp. 11-18
- Alghamri, R.; Kanellopoulos, A.; Al-Tabbaa, A. (2016):** *Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 124, pp. 910-921
- Anscombe, Francis J (1973):** *Graphs in statistical analysis*. The American Statistician, Vol. 27, pp. 17-21
- Antonaci, P.; Bocca, P.; Masera, D. (2012):** *Fatigue crack propagation monitoring by Acoustic Emission signal analysis*. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 81, pp. 26-32
- Anugonda, Phanidhar; Wiehn, Joshua S.; Turner, Joseph A. (2001):** *Diffusion of ultrasound in concrete*. Ultrasonics, Vol. 39, pp. 429-435
- Araújo, M.; Van Tittelboom, K.; Feiteira, J.; Gruyaert, E., et al. (2017):** *Design and testing of tubular polymeric capsules for self-healing of concrete*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 251, pp. 012003
- Asadollahi, Aziz; Khazanovich, Lev (2019):** *Numerical investigation of the effect of heterogeneity on the attenuation of shear waves in concrete*. Ultrasonics, Vol. 91, pp. 34-44
- ASTM C215-14 (2014):** *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA

- Bai, F.; Gagar, D.; Foote, P.; Zhao, Y. (2017):** *Comparison of alternatives to amplitude thresholding for onset detection of acoustic emission signals*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 84, pp. 717-730
- Bancroft, S. (1985):** *An Algebraic Solution of the GPS Equations*. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, Vol. AES-21, pp. 56-59
- Becker, J.; Jacobs, L. J.; Qu, J. (2003):** *Characterization of cement-based materials using diffuse ultrasound*. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 129, pp. 1478-1484
- Behnia, A.; Chai, H. K.; Yorikawa, M.; Momoki, S., et al. (2014):** *Integrated non-destructive assessment of concrete structures under flexure by acoustic emission and travel time tomography*. Construction and Building Materials, Vol. 67, pp. 202-215
- Bendat, Julius S; Piersol, Allan G (2011):** *Random data: analysis and measurement procedures*. John Wiley & Sons
- Bogas, J. Alexandre; Gomes, M. Glória; Gomes, Augusto (2013):** *Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method*. Ultrasonics, Vol. 53, pp. 962-972
- Boileau, P. E.; Greiner, M.; Leach, M. F. (1981):** *A modified resonance method for determining elastic moduli*. NDT International, Vol. 14, pp. 43-48
- Boukria, Z; Limam, A (2012a):** *Experimental damage analysis of concrete structures using the vibration signature-Part II: Located damage (crack)*. International Journal of Mechanics, Vol. 6, pp. 28-34
- Boukria, Z; Limam, A (2012b):** *Experimental damage analysis of concrete structures using the vibration signature - Part I: Diffuse damage (porosity)*. pp 17-27
- Boulay, Claude; Staquet, Stéphanie; Azenha, Miguel; Deraemaeker, Arnaud, et al. (2013):** *Monitoring elastic properties of concrete since very early age by means of cyclic loadings, ultrasonic measurements, natural resonant frequency of component frequency of composite beam (EMM-ARM) and with smart aggregates*. VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Francos 8, pp. 12p
- Brenna, A.; Lazzari, L.; Ormellese, M. (2015):** *Monitoring chloride-induced corrosion of carbon steel tendons in concrete using a multi-electrode system*. Construction and Building Materials, Vol. 96, pp. 434-441
- Bungey, John H.; Grantham, Michael G. (2006):** *Testing of Concrete in Structures*. 4 Ed., CRC Press, London
- Camara, Leticia A.; Wons, Mayara; Esteves, Ian C.A.; Medeiros-Junior, Ronaldo A. (2019):** *Monitoring the Self-healing of Concrete from the Ultrasonic Pulse Velocity*. Journal of Composites Science, Vol. 3, pp. 16
- Cao, M. S.; Sha, G. G.; Gao, Y. F.; Ostachowicz, W. (2017):** *Structural damage identification using damping: a compendium of uses and features*. Smart Materials and Structures, Vol. 26, pp. 043001
- Carette, Jérôme; Staquet, Stéphanie (2016):** *Monitoring and modelling the early age and hardening behaviour of eco-concrete through continuous non-destructive measurements: Part II. Mechanical behaviour*. Cement and Concrete Composites, Vol. 73, pp. 1-9
- Carpinteri, A.; Lacidogna, G.; Accornero, F.; Mpalaskas, A. C., et al. (2013):** *Influence of damage in the acoustic emission parameters*. Cement and Concrete Composites, Vol. 44, pp. 9-16
- Carpinteri, A.; Lacidogna, G.; Corrado, M.; Di Battista, E. (2016):** *Cracking and crackling in concrete-like materials: A dynamic energy balance*. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 155, pp. 130-144
- Cédric, Dumoulin; Arnaud, Deraemaeker (2017):** *Real-time fast ultrasonic monitoring of concrete cracking using embedded piezoelectric transducers*. Smart Materials and Structures, Vol. 26, pp. 104006

- Chai, H. K.; Aggelis, D. G.; Momoki, S.; Kobayashi, Y., et al. (2010a):** *Single-side access tomography for evaluating interior defect of concrete.* Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 2411-2418
- Chai, H. K.; Momoki, S.; Aggelis, D. G.; Shiotani, T. (2010b):** *Characterization of Deep Surface-Opening Cracks in Concrete: Feasibility of Impact-Generated Rayleigh-Waves.* ACI Materials Journal, Vol. 107-M36
- Chaston, A. M.; Edwards, C.; Evans, S. L.; Holford, K. M. (2008):** *Shear wave ultrasonic coupling performance of different adhesives.* Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 50, pp. 633-636
- Chen, Jun; Yang, Chenglong; Guo, Quanquan (2018):** *Evaluation of surface cracks of bending concrete using a fully non-contact air-coupled nonlinear ultrasonic technique.* Materials and Structures, Vol. 51, pp. 104
- Choi, H.; Popovics, J. S. (2015):** *NDE application of ultrasonic tomography to a full-scale concrete structure.* IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 62, pp. 1076-1085
- Chopra, Anil K (2007):** *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering.* Pearson/Prentice Hall Upper Saddle River, NJ
- Chung, C; Popovics, John S; Struble, LJ (2009):** *Early age stiffening of cement paste using ultrasonic wave reflection.* Special Publication, Vol. 259, pp. 7-16
- Colombo, Sabrina; Giannopoulos, A.; Forde, M. C.; Hasson, Roy, et al. (2005):** *Frequency response of different couplant materials for mounting transducers.* NDT & E International, Vol. 38, pp. 187-193
- Consortium, HealCon (2017):** *Final Report Summary - HEALCON (Self-healing concrete to create durable and sustainable concrete structures).*
- Çopuroğlu, O.; Schlangen, E.; Nishiwaki, T.; Van Tittelboom, K., et al. (2013):** *Experimental Techniques Used to Verify Healing.* In: de Rooij, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Schlangen, E. (eds.) *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials*, Springer Netherlands, Dordrecht. pp 19-63
- Cosmes-López, Mario F.; Castellanos, Francisco; Cano-Barrita, Prisciliano F. de J. (2017):** *Ultrasound frequency analysis for identification of aggregates and cement paste in concrete.* Ultrasonics, Vol. 73, pp. 88-95
- Cowan, M. L.; Beaty, K.; Page, J. H.; Liu, Zhengyou, et al. (1998):** *Group velocity of acoustic waves in strongly scattering media: Dependence on the volume fraction of scatterers.* Physical Review E, Vol. 58, pp. 6626-6636
- Croxford, Anthony J.; Moll, Jochen; Wilcox, Paul D.; Michaels, Jennifer E. (2010):** *Efficient temperature compensation strategies for guided wave structural health monitoring.* Ultrasonics, Vol. 50, pp. 517-528
- da Silva, Filipe Bravo; De Belie, Nele; Boon, Nico; Verstraete, Willy (2015):** *Production of non-axenic ureolytic spores for self-healing concrete applications.* Construction and Building Materials, Vol. 93, pp. 1034-1041
- Dang, J.; Zhao, J.; Du, Z. (2017):** *Effect of Superabsorbent Polymer on the Properties of Concrete.* Polymers (Basel), Vol. 9
- Daniel, Jo Sias; Kim, Y. Richard (2001):** *Laboratory Evaluation of Fatigue Damage and Healing of Asphalt Mixtures.* Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 13, pp. 434-440
- Davies, Robert Elfed; Jefferson, Anthony; Lark, Robert; Gardner, Diane (2015):** *A novel 2D vascular network in cementitious materials.* fib Symposium 2015. Copenhagen, Denmark

- Davies, Robert; Teall, Oliver; Pilegis, Martins; Kanellopoulos, Antonios, et al. (2018):** *Large Scale Application of Self-Healing Concrete: Design, Construction, and Testing*. *Frontiers in Materials*, Vol. 5
- De Muynck, Willem; Debrouwer, Dieter; De Belie, Nele; Verstraete, Willy (2008):** *Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, pp. 1005-1014
- De Rooij, Mario; Van Tittelboom, Kim; De Belie, Nele; Schlangen, Erik (2013):** *Self-healing phenomena in cement-Based materials: state-of-the-art report of RILEM technical committee 221-SHC: self-Healing phenomena in cement-Based materials*. Springer
- Delrue, Steven; Aleshin, Vladislav; Truyaert, Kevin; Bou Matar, Olivier, et al. (2018):** *Two dimensional modeling of elastic wave propagation in solids containing cracks with rough surfaces and friction – Part II: Numerical implementation*. *Ultrasonics*, Vol. 82, pp. 19-30
- Deroo, Frederik; Kim, Jin-Yeon; Qu, Jianmin; Sabra, Karim, et al. (2010):** *Detection of damage in concrete using diffuse ultrasound*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 127, pp. 3315-3318
- Didier, Snoeck; Fabian, Malm; Veerle, Cnudde; U., Grosse Christian, et al. (2018):** *Validation of Self-Healing Properties of Construction Materials through Nondestructive and Minimal Invasive Testing*. *Advanced Materials Interfaces*
- DIN EN 1992-1-1:2011-01 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.**
- Dong, Biqin; Fang, Guohao; Ding, Weijian; Liu, Yuqing, et al. (2016):** *Self-healing features in cementitious material with urea-formaldehyde/epoxy microcapsules*. *Construction and Building Materials*, Vol. 106, pp. 608-617
- Dry, Carolyn; Corsaw, Mindy; Bayer, Ertan (2003):** *A comparison of internal self-repair with resin injection in repair of concrete*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 17, pp. 79-89
- Dry, Carolyn M. (1994):** *Smart multiphase composite materials that repair themselves by a release of liquids that become solids*, Vol. 2189, pp. 62-70
- Dumoulin, C.; Deraemaeker, A. (2016):** *Design of embedded piezoelectric transducers for structural health monitoring in concrete structures*. 8th European Workshop On Structural Health Monitoring (EWSHM 2016). Spain, Bilbao
- Dumoulin, Cédric; Deraemaeker, Arnaud (2017):** *Design optimization of embedded ultrasonic transducers for concrete structures assessment*. *Ultrasonics*, Vol. 79, pp. 18-33
- E1876-15, ASTM (2015):** *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. ASTM International, West Conshohocken, PA
- Edvardsen, Carola (1999):** *Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete*. *ACI Materials Journal*, Vol. 96, pp. 448-454
- Edwards, Jack T (2015):** *Civil engineering for underground rail transport*. Elsevier
- Eiras, Jesús N.; Kundu, Tribikram; Popovics, John S.; Monzó, José M., et al. (2015):** *Effect of carbonation on the linear and nonlinear dynamic properties of cement-based materials*. *Optical Engineering*, Vol. 55, pp. 1-7, 7
- Eligehausen, R.; Mattis, L.; Wollmershauser, R.; Hoehler, M.S. (2004):** *Testing anchors in cracked concrete – Guidance for testing laboratories: how to generate cracks*. *Concrete International*, Vol. 26(07), pp. 66-71

- Feiteira, J.; Gruyaert, E.; De Belie, N. (2014):** *Self-healing of dynamic concrete cracks using polymer precursors as encapsulated healing agents*. In: Concrete Solutions 2014, CRC Press. pp 65-69
- Feiteira, J.; Gruyaert, E.; De Belie, N. (2016):** *Self-healing of moving cracks in concrete by means of encapsulated polymer precursors*. Construction and Building Materials, Vol. 102, Part 1, pp. 671-678
- Feiteira, J.; Tsangouri, E.; Gruyaert, E.; Lors, C., et al. (2017):** *Monitoring crack movement in polymer-based self-healing concrete through digital image correlation, acoustic emission analysis and SEM in-situ loading*. Materials & Design, Vol. 115, pp. 238-246
- Feiteira, João Luis Garcia (2017):** *Self-healing Concrete : Encapsulated Polymer Precursors as Healing Agents for Active Cracks*. PhD (Thesis), Faculty of Engineering and Architecture, Ghent University, Belgium
- Fey, P; Döring, D; Busse, G; Frick, J, et al. (2012):** *Preliminary results on non-contact characterisation of weathered mineral materials by surface acoustic waves*. In: Emerging Technologies in Non-Destructive Testing V, Taylor & Francis Group, London. pp 271-274
- Filho, Romildo D. Toledo; Silva, Eugenia F.; Lopes, Anne N. M.; Mechtcherine, Viktor, et al. (2012):** *Effect of Superabsorbent Polymers on the Workability of Concrete and Mortar*. In: Mechtcherine, V., Reinhardt, H.-W. (eds.) Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction: State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP, Springer Netherlands, Dordrecht. pp 39-50
- Fransesqui, Miguel A.; Yepes, Jorge; García-González, Cándida (2017):** *Ultrasound data for laboratory calibration of an analytical model to calculate crack depth on asphalt pavements*. Data in Brief, Vol. 13, pp. 723-730
- Garcia Feiteira, João Luis; Couvreur, J; Gruyaert, Elke; De Belie, Nele (2016):** *Resistance to fatigue of self-healed concrete based on encapsulated polymer precursors*. 6th International Conference on Concrete Repair, pp. 585-588. CRC Press-Taylor and Francis Group
- Gardner, Diane; Jefferson, Anthony; Hoffman, Andrea; Lark, Robert (2014):** *Simulation of the capillary flow of an autonomic healing agent in discrete cracks in cementitious materials*. Cement and Concrete Research, Vol. 58, pp. 35-44
- Gaydecki, P. A.; Burdekin, F. M.; Damaj, W.; John, D. G. (1992):** *The propagation and attenuation of medium-frequency ultrasonic waves in concrete: a signal analytical approach*. Measurement Science and Technology, Vol. 3, pp. 126-134
- Ge, Maochen (2003a):** *Analysis of source location algorithms Part I: Overview and non-iterative methods*. J. Acoustic Emission, Vol. 21, pp. 14-24
- Ge, Maochen (2003b):** *Analysis of source location algorithms: Part II. Iterative methods*. Journal of Acoustic Emission, Vol. 21, pp. 29-51
- Geiger, L. (1910):** *Herdbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten*. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch- Physikalische Klasse, pp. 331-349
- Gilabert, F. A.; Van Tittelboom, K.; Van Stappen, J.; Cnudde, V., et al. (2017):** *Integral procedure to assess crack filling and mechanical contribution of polymer-based healing agent in encapsulation-based self-healing concrete*. Cement and Concrete Composites, Vol. 77, pp. 68-80
- Glaser, Steven D.; Weiss, Gregory G.; Johnson, Lane R. (1998):** *Body waves recorded inside an elastic half-space by an embedded, wideband velocity sensor*. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 104, pp. 1404-1412
- Godinho, L.; Dias-da-Costa, D.; Areias, P.; Júlio, E., et al. (2013):** *Numerical study towards the use of a SH wave ultrasonic-based strategy for crack detection in concrete structures*. Engineering Structures, Vol. 49, pp. 782-791

- Goens, E. (1931):** *Über die Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Stäben mit Hilfe von Biegungsschwingungen.* Annalen der Physik, Vol. 403, pp. 649-678
- Gollob, Stephan; Kocur, Georg Karl; Schumacher, Thomas; Mhamdi, Lassaad, et al. (2017):** *A novel multi-segment path analysis based on a heterogeneous velocity model for the localization of acoustic emission sources in complex propagation media.* Ultrasonics, Vol. 74, pp. 48-61
- Gong, Peng; Patton, Mark E.; Greve, David W.; Harley, Joel B., et al. (2014):** *Alkali-silica reaction (ASR) detection in concrete from frequency dependent ultrasonic attenuation.* AIP Conference Proceedings, Vol. 1581, pp. 909-916
- Gore, J. C.; Leeman, S. (1979):** *Transfer functions for describing ultrasound system performance.* Physics in Medicine and Biology, Vol. 24, pp. 146-156
- Goueygou, M.; Abraham, O.; Lataste, J. F. (2008):** *A comparative study of two non-destructive testing methods to assess near-surface mechanical damage in concrete structures.* NDT & E International, Vol. 41, pp. 448-456
- Granger, S.; Loukili, A.; Pijaudier-Cabot, G.; Chanvillard, G. (2007):** *Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis.* Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp. 519-527
- Granger, S.; Pijaudier Cabot, G.; Loukili, A.; Marlot, D., et al. (2009):** *Monitoring of cracking and healing in an ultra high performance cementitious material using the time reversal technique.* Cement and Concrete Research, Vol. 39, pp. 296-302
- Gross, Dietmar; Hauger, Werner; Wriggers, Peter (2018):** *Grundlagen der Elastizitätstheorie.* In: Technische Mechanik 4: Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. pp 67-155
- Grosse, C (2011):** *Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen – Möglichkeiten und Grenzen.* VDI-Bautechnik, pp. 122-131
- Grosse, Christian (1996):** *Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall.* PhD (Thesis), Universität Stuttgart
- Grosse, Christian U; Finck, Florian (2006):** *Quantitative evaluation of fracture processes in concrete using signal-based acoustic emission techniques.* Cement and Concrete Composites, Vol. 28, pp. 330-336
- Grosse, Christian U; Ohtsu, Masayasu (2008):** *Acoustic Emission Testing: Basics for Research - Applications in Civil Engineering.* Springer, Berlin, Heidelberg. pp 406
- Grosse, Christian U; Reinhardt, Hans W; Motz, Markus; Kroplin, B (2002):** *Signal conditioning in acoustic emission analysis using wavelets.* NDT. net, Vol. 7, pp. 1-9
- Grosse, Christian U.; Reinhardt, Hans W.; Finck, Florian (2003):** *Signal-Based Acoustic Emission Techniques in Civil Engineering.* Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15, pp. 274-279
- Gruyaert, E.; Van Tittelboom, K.; Sucaet, J.; Anrijs, J., et al. (2016a):** *Capsules with evolving brittleness to resist the preparation of self-healing concrete.* Materiales de Construcción, Vol. 66, pp. e092
- Gruyaert, Elke; Debbaut, Brenda; Snoeck, Didier; Díaz, Pilar, et al. (2016b):** *Self-healing mortar with pH-sensitive superabsorbent polymers: testing of the sealing efficiency by water flow tests.* Smart Materials and Structures, Vol. 25
- Gruyaert, Elke; Debbaut, Brenda; Snoeck, Didier; Díaz, Pilar, et al. (2016c):** *Self-healing mortar with pH-sensitive superabsorbent polymers: testing of the sealing efficiency by water flow tests.* Smart Materials and Structures, Vol. 25, pp. 084007

- Gruyaert, Elke; Garcia Feiteira, João Luis; Debbaut, Brenda; Tziviloglou, E, et al. (2015):** *Evaluation of the self-healing effect of mortar containing polymeric healing agents*. 5th International conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2015). Duke University
- Gupta, Sakshi (2018a):** *Comparison of Non-Destructive and Destructive Testing on Concrete: A Review*. Trends In Civil Engineering And Its Architecture, Vol. 3, pp. 351-357
- Gupta, Souradeep (2018b):** *Effect of presoaked superabsorbent polymer on strength and permeability of cement mortar*. Magazine of Concrete Research, Vol. 70, pp. 473-486
- Gupta, Souradeep; Kua, Harn Wei (2016):** *Encapsulation Technology and Techniques in Self-Healing Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 28, pp. 04016165
- Gupta, Souradeep; Pang, Sze Dai; Kua, Harn Wei (2017):** *Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents – A review*. Construction and Building Materials, Vol. 146, pp. 419-428
- Haach, Vladimir G.; Ramirez, Fernando C. (2016):** *Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography*. Construction and Building Materials, Vol. 119, pp. 61-70
- Hadziioannou, Céline; Larose, Eric; Coutant, Olivier; Roux, Philippe, et al. (2009):** *Stability of monitoring weak changes in multiply scattering media with ambient noise correlation: Laboratory experiments*. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 125, pp. 3688-3695
- Hahn, Hans Georg (1985):** *Stoffgesetz der Elastizitätstheorie (Beziehung zwischen Spannungen und Verzerrungen)*. In: *Elastizitätstheorie: Grundlagen der linearen Theorie und Anwendungen auf eindimensionale, ebene und räumliche Probleme*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden. pp 54-69
- Han, Sanghyun; Choi, Eun Kyung; Park, Woojun; Yi, Chongku, et al. (2019):** *Effectiveness of expanded clay as a bacteria carrier for self-healing concrete*. Applied Biological Chemistry, Vol. 62, pp. 19
- Hassan, A. M. T.; Jones, S. W. (2012):** *Non-destructive testing of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques*. Construction and Building Materials, Vol. 35, pp. 361-367
- Hilloulin, Benoit; Legland, Jean-Baptiste; Lys, Elisabeth; Abraham, Odile, et al. (2016):** *Monitoring of autogenous crack healing in cementitious materials by the nonlinear modulation of ultrasonic coda waves, 3D microscopy and X-ray microtomography*. Construction and Building Materials, Vol. 123, pp. 143-152
- Hilloulin, Benoit; Van Tittelboom, Kim; Gruyaert, Elke; De Belie, Nele, et al. (2015):** *Design of polymeric capsules for self-healing concrete*. Cement and Concrete Composites, Vol. 55, pp. 298-307
- Hsu, Nelson N (1977):** *Acoustic emissions simulator*. US Patent 4,018,084
- Hu, Zun-Xiang; Hu, Xiang-Ming; Cheng, Wei-Min; Zhao, Yan-Yun, et al. (2018):** *Performance optimization of one-component polyurethane healing agent for self-healing concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 179, pp. 151-159
- Huang, Haoliang; Ye, Guang; Shui, Zhonghe (2014):** *Feasibility of self-healing in cementitious materials – By using capsules or a vascular system?* Construction and Building Materials, Vol. 63, pp. 108-118
- Hussain, Zahir M; Sadik, Amin Z; O’Shea, Peter (2011):** *Digital signal processing: an introduction with MATLAB and applications*. Springer
- In, Chi-Won; Arne, Kevin; Kim, Jin-Yeon; Kurtis, Kimberly E., et al. (2016):** *Estimation of Crack Depth in Concrete Using Diffuse Ultrasound: Validation in Cracked Concrete Beams*. Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 36, pp. 4
- In, Chi-Won; Holland, R. Brett; Kim, Jin-Yeon; Kimberly, E. Kurtis, et al. (2013):** *Monitoring and evaluation of self-healing in concrete using diffuse ultrasound*. NDT&E International, Vol. 57, pp. 36-44

- In, Chi-Won; Schempp, Fabian; Kim, Jin-Yeon; Jacobs, Laurence J. %J** *Journal of Nondestructive Evaluation* (2014): *A Fully Non-contact, Air-Coupled Ultrasonic Measurement of Surface Breaking Cracks in Concrete*, Vol. 34, pp. 272
- Issa, Camille A.; Debs, Pauls (2007):** *Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete*. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 157-163
- Ito, Y.; Uomoto, T. (1997):** *Nondestructive testing method of concrete using impact acoustics*. *NDT & E International*, Vol. 30, pp. 217-222
- Jonkers, Henk M. (2007):** *Self Healing Concrete: A Biological Approach*. In: van der Zwaag, S. (eds.) *Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*, Springer Netherlands, Dordrecht. pp 195-204
- Jonkers, Henk M. (2011):** *Bacteria-based self-healing concrete*. *HERON*, Vol. 56, No. 1/2, pp. 1-12
- Jonkers, Henk M.; Thijssen, Arjan; Muyzer, Gerard; Copuroglu, Oguzhan, et al. (2010):** *Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete*. *Ecological Engineering*, Vol. 36, pp. 230-235
- Joseph, C.; Jefferson, A.D.; Isaacs, B.; Lark, R., et al. (2010):** *Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials*. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 62, pp. 831-843
- Jurowski, Krystian; Grzeszczyk, Stefania (2015):** *The Influence of Concrete Composition on Young's Modulus*. *Procedia Engineering*, Vol. 108, pp. 584-591
- Kaneko, T. (1975):** *On Timoshenko's correction for shear in vibrating beams*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 8, pp. 1927
- Kanellopoulos, A.; Giannaros, P.; Al-Tabbaa, A. (2016):** *The effect of varying volume fraction of microcapsules on fresh, mechanical and self-healing properties of mortars*. *Construction and Building Materials*, Vol. 122, pp. 577-593
- Kanellopoulos, A.; Giannaros, P.; Palmer, D.; Kerr, A., et al. (2017):** *Polymeric microcapsules with switchable mechanical properties for self-healing concrete: synthesis, characterisation and proof of concept*. *Smart Materials and Structures*, Vol. 26, pp. 045025
- Karaiskos, G.; Deraemaeker, A.; Aggelis, D. G.; Hemelrijck, D. Van (2015):** *Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method*. *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, pp. 113001
- Karaiskos, G.; Tsangouri, E.; Aggelis, D. G.; Tittelboom, K. Van, et al. (2016):** *Performance monitoring of large-scale autonomously healed concrete beams under four-point bending through multiple non-destructive testing methods*. *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, pp. 055003
- Kessler, Sylvia; Thiel, Charlotte; Grosse, Christian U.; Gehlen, Christoph (2016):** *Effect of freeze-thaw damage on chloride ingress into concrete*. *Materials and Structures*, Vol. 50, pp. 121
- Kim, Gun; In, Chi-Won; Kim, Jin-Yeon; Kurtis, Kimberly E., et al. (2014):** *Air-coupled detection of nonlinear Rayleigh surface waves in concrete—Application to microcracking detection*. *NDT & E International*, Vol. 67, pp. 64-70
- Kim, Gun; Kim, Jin-Yeon; Kurtis, Kimberly E.; Jacobs, Laurence J., et al. (2016):** *Quantitative evaluation of carbonation in concrete using nonlinear ultrasound*. *Materials and Structures*, Vol. 49, pp. 399-409
- Kim, H.; Heo, S. W. (2012):** *Time-domain calculation of spectral centroid from backscattered ultrasound signals*. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 59, pp. 1193-1200
- Klemm, Agnieszka J.; Sikora, Karol S. (2013):** *The effect of Superabsorbent Polymers (SAP) on microstructure and mechanical properties of fly ash cementitious mortars*. *Construction and Building Materials*, Vol. 49, pp. 134-143

- Kocur, Georg Karl (2017):** *Deconvolution of acoustic emissions for source localization using time reverse modeling.* Journal of Sound and Vibration, Vol. 387, pp. 66-78
- Köppel, Stefan (2002):** *Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Stahlbetontragwerken.* PhD (Thesis), Technische Hochschule Zürich
- Kozlov, A. V.; Kozlov, V. N. (2015):** *The development and current state of methods for the nondestructive testing and acoustic tomography of concrete.* Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 51, pp. 329-337
- Krafcik, Matthew J.; Macke, Nicholas D.; Erk, Kendra A. (2017):** *Improved Concrete Materials with Hydrogel-Based Internal Curing Agents.* Gels, Vol. 3, pp. 46
- Krautkrämer, Josef; Krautkrämer, Herbert (1986a):** *Die Schwächung von Ultraschallwellen in festen Stoffen.* In: Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. pp 113-121
- Krautkrämer, Josef; Krautkrämer, Herbert (1986b):** *Werkstoffprüfung mit Ultraschall.* Springer Verlag Berlin Heidelberg
- Krüger, M.; Grosse, C. U.; Lehmann, F. (2013):** *Automated Shear-Wave Techniques to Investigate the Setting and Hardening of Concrete in Through-Transmission.* In: Güneş, O., Akkaya, Y. (eds.) Nondestructive Testing of Materials and Structures, Springer Netherlands, Dordrecht. pp 431-436
- Krüger, M.; Große, C. U.; Lehmann, F.; Reinhardt, H.-W. (2011):** *Zuverlässige Qualitätssicherung von Frischbeton mit Ultraschall - das FreshCon-System.* Ernst & Sohn Special - Messtechnik im Bauwesen, pp. 88-92
- Kundu, Tribikram (2013):** *Acoustic source localization.* Ultrasonics, Vol. 54, pp. 25-38
- Kurz, Jochen H. (2015):** *New approaches for automatic three-dimensional source localization of acoustic emissions – Applications to concrete specimens.* Ultrasonics, Vol. 63, pp. 155-162
- Kurz, Jochen H.; Grosse, Christian U.; Reinhardt, Hans-Wolf (2005):** *Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete.* Ultrasonics, Vol. 43, pp. 538-546
- Kurz, Jochen H.; Köppel, Stefan; Linzer, Lindsay M.; Schechinger, Barbara, et al. (2008):** *Source Localization.* In: Grosse, C., Ohtsu, M. (eds.) Acoustic Emission Testing: Basics for Research - Applications in Civil Engineering, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. pp 101-147
- Kurz, Jochen Horst (2006):** *Verifikation von Bruchprozessen bei gleichzeitiger Automatisierung der Schallemissionsanalyse an Stahl- und Stahlfaserbeton,* Doktor-Ingenieur (Thesis), Bau- und Umweltingenieurwissenschaft, Universität Stuttgart, Stuttgart
- Landis, Eric; Shah, Surendra (1995):** *Frequency-Dependent Stress Wave Attenuation in Cement-Based Materials.*
- Larose, Eric; Hall, Stephen, A. (2009):** *Monitoring stress related velocity variation in concrete with a  $2.10^{-5}$  relative resolution using diffuse ultrasound.* Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 125, pp. 1853-1856
- Lee, Foo; Chai, Hwa; Lim, Kok (2016):** *Assessment of Reinforced Concrete Surface Breaking Crack Using Rayleigh Wave Measurement.* Sensors, Vol. 16, pp. 337
- Lee, H. X. D.; Wong, H. S.; Buenfeld, N. R. (2010):** *Potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete.* Advances in Applied Ceramics, Vol. 109, pp. 296-302
- Lee, Yong-Soo; Ryou, Jae-Suk (2014):** *Self healing behavior for crack closing of expansive agent via granulation/film coating method.* Construction and Building Materials, Vol. 71, pp. 188-193

- Leonard, M. (2000):** *Comparison of Manual and Automatic Onset Time Picking*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 90, pp. 1384-1390
- Lerch, Reinhard; Sessler, Gerhard; Wolf, Dietrich (2009):** *Akustische Wellen in festen Körpern*. In: Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. pp 93-132
- Li, Victor C.; Lim, Yun Mook; Chan, Yin-Wen (1998):** *Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite*. Composites Part B: Engineering, Vol. 29, pp. 819-827
- Lin, Yiching; Kuo, Shih-Fang; Chang, Chiafeng (2000):** *Use of stress waves for measuring surface-opening crack in mass concrete*. 15th World Conference on Non-Destructive Testing, pp. 15-21
- Lin, Yiching; Shih-Fang, Kuo; Hsiao, Chiamen; Chao-Peng, Lai (2007):** *Investigation of pulse velocity-strength relationship of hardened concrete*. ACI Materials Journal, Vol. 104, pp. 344
- Liu, P. L.; Lee, K. H.; Wu, T. T.; Kuo, M. K. (2001):** *Scan of surface-opening cracks in reinforced concrete using transient elastic waves*. NDT & E International, Vol. 34, pp. 219-226
- Liu, Shukui; Bundur, Zeynep Basaran; Zhu, Jinying; Ferron, Raissa Douglas (2016):** *Evaluation of self-healing of internal cracks in biomimetic mortar using coda wave interferometry*. Cement and Concrete Research, Vol. 83, pp. 70-78
- Maes, Mathias; De Belie, Nele (2014):** *The efficiency of autonomous crack healing of mortar in chloride solutions*. XIII International Conference on Durability of Building Materials and Components (XIII DBMC), pp. 212-219
- Mahnken, Rolf (2015):** *Mehrdimensionale Spannungs- und Verzerrungszustände*. In: Lehrbuch der Technischen Mechanik - Elastostatik: Mit einer Einführung in Hybridstrukturen, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. pp 177-230
- Malm, F; Grosse, C (2014):** *Examination of Reinforced Concrete Beams with Self-Healing Properties by Acoustic Emission Analysis*. 31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE)
- Mardani-Aghabaglou, Ali; Tuyan, Murat; Yılmaz, Gökhan; Ariöz, Ömer, et al. (2013):** *Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 47, pp. 1020-1025
- Martinček, Gustáv (1965):** *The determination of poisson's ratio and the dynamic modulus of elasticity from the frequencies of natural vibration in thick circular plates*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 2, pp. 116-127
- Marzani, Alessandro; Salamone, Salvatore (2012):** *Numerical prediction and experimental verification of temperature effect on plate waves generated and received by piezoceramic sensors*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 30, pp. 204-217
- Masserey, Bernard; Mazza, Edoardo (2005):** *Analysis of the near-field ultrasonic scattering at a surface crack*. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 118, pp. 3585-3594
- Mayer, Christoph (2016):** *Zerstörungsfreie Prüfung von Betonprobekörpern mit bakterienbasierten Selbstheilungseigenschaften*. M. Sc. (Thesis), M. Sc. (Thesis), Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München, München
- Maznikova, Gergana (2015):** *Non-Destructive Testing and Simulation of Mortar Prisms with Self-Healing Properties*. M.Sc. (Thesis), Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München
- Mborah, Charles; Ge, Maochen (2018):** *Enhancing manual P-phase arrival detection and automatic onset time picking in a noisy microseismic data in underground mines*. International Journal of Mining Science and Technology, Vol. 28, pp. 691-699

- McLaskey, G. C.; Glaser, S. D. (2010a):** *Hertzian impact: experimental study of the force pulse and resulting stress waves.* J Acoust Soc Am, Vol. 128, pp. 1087-1096
- McLaskey, Gregory C.; Glaser, Steven D.; Grosse, Christian U. (2010b):** *Beamforming array techniques for acoustic emission monitoring of large concrete structures.* Journal of Sound and Vibration, Vol. 329, pp. 2384-2394
- Meo, M. (2014):** *6 - Acoustic emission sensors for assessing and monitoring civil infrastructures.* In: Wang, M. L., Lynch, J. P., Sohn, H. (eds.) *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*, Woodhead Publishing, pp. 159-178
- Mielentz, Frank (2008):** *Phased Arrays for Ultrasonic Investigations in Concrete Components.* Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 27, pp. 23-33
- Miller, G. F.; Pursey, H.; Bullard, Edward Crisp (1955):** *On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid,* Vol. 233, pp. 55-69
- Minnebo, Pieter; Thierens, Glenn; De Valck, Glenn; Van Tittelboom, Kim, et al. (2017):** *A Novel Design of Autonomously Healed Concrete: Towards a Vascular Healing Network.* Materials, Vol. 10, pp. 49
- Molyneux, Joseph B.; Schmitt, Douglas R. (1999):** *First-break timing: Arrival onset times by direct correlation.* GEOPHYSICS, Vol. 64, pp. 1492-1501
- Moradi-Marani, Farid; Rivard, Patrice; Lamarche, Charles-Philippe; Kodjo, Serge Apedovi (2014):** *Evaluating the damage in reinforced concrete slabs under bending test with the energy of ultrasonic waves.* Construction and Building Materials, Vol. 73, pp. 663-673
- Moser, Dorothee (2014):** *Charakterisierung von Schädigungen in Gesteinen bei Impaktprozessen mit zerstörungsfreier Prüfung,* PhD (Thesis), Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München, München
- Moser, Dorothee; Poelchau, Michael H.; Stark, Florian; Grosse, Christian (2013):** *Application of nondestructive testing methods to study the damage zone underneath impact craters of MEMIN laboratory experiments.* Meteoritics & Planetary Science, Vol. 48, pp. 87-98
- Mostavi, Ehsan; Asadi, Somayeh; Hassan, Marwa M.; Alansari, Mohamed (2015):** *Evaluation of Self-Healing Mechanisms in Concrete with Double-Walled Sodium Silicate Microcapsules.* Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 27, pp. 04015035
- Muhammad, Nasiru Zakari; Shafaghat, Arezou; Keyvanfar, Ali; Abd. Majid, Muhd Zaimi, et al. (2016):** *Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review.* Construction and Building Materials, Vol. 112, pp. 1123-1132
- Mullem, Tim Van; Wang, Jianyun; Debbaut, Brenda; Gruyaert, Elke, et al. (2017):** *New cracking method to improve the evaluation of the sealing capacity of self-healing mortar via water flow tests.* 6th International Conference on Self-Healing Materials. Friedrichshafen, Germany
- Müller, Maximilian (2015):** *Experimentelle Untersuchung des nicht-linearen Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens zementgebundener Werkstoffe mit Ultraschall.* Master (Thesis), Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technische Universität München
- Musial, Michal; Grosel, Jacek (2016):** *Determining the Young's modulus of concrete by measuring the eigenfrequencies of concrete and reinforced concrete beams.* Construction and Building Materials, Vol. 121, pp. 44-52
- Nakahata, K.; Kawamura, G.; Yano, T.; Hirose, S. (2015):** *Three-dimensional numerical modeling of ultrasonic wave propagation in concrete and its experimental validation.* Construction and Building Materials, Vol. 78, pp. 217-223

- Natke, Hans Günther (1988):** *Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse: Identifikation schwingungsfähiger elastomechanischer Systeme (Second Edition)*. Springer-Verlag
- Niederleithinger, Ernst; Wolf, Julia; Mielentz, Frank; Wiggerhauser, Herbert, et al. (2015):** *Embedded ultrasonic transducers for active and passive concrete monitoring*. Sensors (Basel, Switzerland), Vol. 15, pp. 9756-9772
- Ohno, K. (2015):** *3 - Identification of the fracture process zone in concrete materials by acoustic emission A2 - Ohtsu, Masayasu*. In: *Acoustic Emission and Related Non-Destructive Evaluation Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete*, Woodhead Publishing, Oxford. pp 41-55
- Ohtsu, M. (2015):** *Acoustic Emission (AE) and Related Non-destructive Evaluation (NDE) Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete: Fundamentals and Applications*. pp 1-291
- Ohtsu, Masayasu (2011):** *Damage evaluation in freezing and thawing test of concrete by elastic-wave methods*. Materials and Structures, Vol. 44, pp. 1725-1734
- Ohtsu, Masayasu (2016):** *Elastic wave methods for NDE in concrete based on generalized theory of acoustic emission*. Construction and Building Materials, Vol. 122, pp. 845-854
- Olawuyi, Babatunde James; Boshoff, William P. (2014):** *3D -VOID ANALYSIS OF HIGH PERFORMANCE CONCRETES CONTAINING SUPERABSORBENT POLYMERS (SAP)*. International RILEM Conference on Application of Superabsorbent Polymers and Other New admixtures in Concrete Construction, Edition Ed., Dresden, Germany
- Olawuyi, BJ; Boshoff, WP (2013):** *Compressive strength of high-performance concrete with absorption capacity of Super-Absorbing-Polymers (SAP)*. Proceedings of the Research and Application in Structural Engineering, Mechanics and Computation, Cape Town, South Africa, pp. 2-4
- Omondi, Benard; Aggelis, Dimitrios G; Sol, Hugo; Sitters, Cox (2016):** *Improved crack monitoring in structural concrete by combined acoustic emission and digital image correlation techniques*. Structural Health Monitoring, Vol. 15, pp. 359-378
- Ono, Kanji (2016):** *Calibration Methods of Acoustic Emission Sensors*. Materials, Vol. 9, pp. 508
- Ono, Kanji (2017):** *Critical examination of ultrasonic transducer characteristics and calibration methods*. Research in Nondestructive Evaluation, Vol. 30, pp. 19-64
- Ono, Kanji (2018):** *Frequency Dependence of Receiving Sensitivity of Ultrasonic Transducers and Acoustic Emission Sensors*. Sensors, Vol. 18, pp. 3861
- Ono, Kanji; Hayashi, Takahiro; Cho, Hideo (2017):** *Bar-Wave Calibration of Acoustic Emission Sensors*. Applied Sciences, Vol. 7, pp. 964
- Oppenheim, Alan V; Schafer, Ronald W (2014):** *Discrete-time signal processing*. Pearson Education
- Page, J. H.; Jones, I. P.; Schriemer, H. P.; Cowan, M. L., et al. (1999):** *Diffusive transport of acoustic waves in strongly scattering media*. Physica B: Condensed Matter, Vol. 263-264, pp. 37-39
- Pahlavan, Lotfollah; Zhang, Fengqiao; Blacquièrre, Gerrit; Yang, Yuguang, et al. (2018):** *Interaction of ultrasonic waves with partially-closed cracks in concrete structures*. Construction and Building Materials, Vol. 167, pp. 899-906
- Pal Kaur, Nimrat; Kumar Shah, Jay; Majhi, Subhra; Mukherjee, Abhijit (2018):** *Healing and Simultaneous Ultrasonic Monitoring of Cracks in Concrete*. Materials Today Communications
- Pandey, A. K.; Biswas, M. (1994):** *Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 169, pp. 3-17

- Pelto, Jani; Leivo, Markku; Gruyaert, Elke; Debbaut, Brenda, et al. (2017):** *Application of encapsulated superabsorbent polymers in cementitious materials for stimulated autogenous healing.* Smart Materials and Structures, Vol. 26, pp. 105043
- Pickett, Gerald (1945):** *Equations for computing elastic constants from flexural and torsional resonant frequencies of vibration of prisms and cylinders.*
- Pinto, Roberto CA; Medeiros, Arthur; Padaratz, IJ; Andrade, Patricia B (2010):** *Use of ultrasound to estimate depth of surface opening cracks in concrete structures.* E-Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonics, Vol. 8, pp. 1-11
- Planès, T.; Larose, E. (2013):** *A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete.* Cement and Concrete Research, Vol. 53, pp. 248-255
- Pohl, Prof. Erwin (1969):** *Zerstörungsfreie Prüf- und Meßmethoden für Beton.* VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, pp 200
- Popovics, J. S.; Abraham, O. (2010):** *20 - Surface wave techniques for evaluation of concrete structures.* In: Maierhofer, C., Reinhardt, H.-W., Dobmann, G. (eds.) Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures, Woodhead Publishing. pp 441-465
- Popovics, Sandor (1975):** *Verification of relationships between mechanical properties of concrete-like materials.* Matériaux et Construction, Vol. 8, pp. 183-191
- Price, Eric; Krüger, M; Willeke, J (2015):** *Presenting a unified framework for generic sensor data storage, synchronization and post processing independent of sensor type and dimensionality.* 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, SHMII 2015
- Pungrasmi, Wiboonluk; Intarasontron, Jirapa; Jongvivatsakul, Pitcha; Likitlersuang, Suched (2019):** *Evaluation of Microencapsulation Techniques for MICP Bacterial Spores Applied in Self-Healing Concrete.* Scientific Reports, Vol. 9, pp. 12484
- Punurai, W.; Jarzynski, J.; Qu, J.; Kurtis, K. E., et al. (2007):** *Characterization of dissipation losses in cement paste with diffuse ultrasound.* Mechanics Research Communications, Vol. 34, pp. 289-294
- Qixian, Luo; Bungey, J. H. (1996):** *Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete.* Construction and Building Materials, Vol. 10, pp. 237-242
- Quinn, William; Kelly, Ger; Barrett, John (2012):** *Development of an embedded wireless sensing system for the monitoring of concrete.* Structural Health Monitoring, Vol. 11, pp. 381-392
- Radlmeier, Martin (in Bearbeitung):** *Schallemissionsanalyse an CFK-Strukturen,* PhD (Thesis), Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München, München
- Raith, Manuel (2013):** *Schallemissionsanalyse bei Pulloutexperimenten an Verbunddübeln.* Master Thesis (Thesis), Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München, München
- Raith, Manuel; Ebert, Matthias; Pinkert, Katja; Grosse, Christian U. (2018):** *Nondestructive imaging of hypervelocity impact-induced damage zones beneath laboratory-created craters by means of ultrasound travel-time tomography.* Meteoritics & Planetary Science, Vol. 53, pp. 1756-1772
- Rajczakowska, Magdalena; Nilsson, Lennart; Habermehl-Cwirzen, Karin; Hedlund, Hans, et al. (2019):** *Does a High Amount of Unhydrated Portland Cement Ensure an Effective Autogenous Self-Healing of Mortar?* Materials, Vol. 12, pp. 3298
- Reinhardt, Hans-Wolf; Jooss, Martin (2003):** *Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width.* Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 981-985

- Ren, Jun; Wang, Jun; Bi, Shusheng (2017):** *Correction of Transducers Mass Effects from the Measured FRFs in Hammer Impact Testing*. Shock and Vibration, Vol. 2017, pp. 6857326
- Rodríguez, C. Romero; Figueiredo, S. Chaves; Deprez, M.; Snoeck, D., et al. (2019):** *Numerical investigation of crack self-sealing in cement-based composites with superabsorbent polymers*. Cement and Concrete Composites, Vol. 104, pp. 103395
- Rucka, Magdalena; Wilde, Krzysztof (2013):** *Experimental Study on Ultrasonic Monitoring of Splitting Failure in Reinforced Concrete*. Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 32, pp. 372-383
- Salawu, O. S. (1997):** *Detection of structural damage through changes in frequency: a review*. Engineering Structures, Vol. 19, pp. 718-723
- Sansalone, Mary; Lin, Jiunn-Ming; Streett, William B. (1998):** *Determining the Depth of Surface-Opening Cracks using Impact-Generated Stress Waves and Time-of-Flight Techniques*. Materials Journal, Vol. 95
- Savija, B; Schlangen, E (2015):** *Modelling the influence of cracking and healing on modal properties of concrete beams*. ICSHM 2015: Proceedings of the 5th International Conference on Self-Healing Materials, Durham, USA, 22-24 June 2015
- Šavija, Branko; Feiteira, João; Araújo, Maria; Chatrabhuti, Sutima, et al. (2016):** *Simulation-Aided Design of Tubular Polymeric Capsules for Self-Healing Concrete*. Materials (Basel, Switzerland)
- Sbartai, ZM; Boniface, A; Saliba, J (2015):** *Improvement of damage localization in concrete by acoustic emission using an adaptive meshing algorithm*. 15th International Academic Conference on Engineering, Technology and Innovations (IACETI) Singapore Dec
- Schabowicz, K. (2014):** *Ultrasonic tomography – The latest nondestructive technique for testing concrete members – Description, test methodology, application example*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 14, pp. 295-303
- Schickert, M. (2005):** *Progress in ultrasonic imaging of concrete*. Materials and Structures, Vol. 38, pp. 807-815
- Schiebold, Karlheinz (2015):** *Physikalische Grundlagen*. In: *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung-Ultraschallprüfung*, Springer. pp 3-34
- Schmerr, Lester; Song, Jung-Sin (2007):** *Ultrasonic nondestructive evaluation systems: Models and Measurements*. Springer, Boston, MA
- Schreiberová, Hana; Bílý, Petr; Fládr, Josef; Šeps, Karel, et al. (2019):** *Impact of the self-healing agent composition on material characteristics of bio-based self-healing concrete*. Case Studies in Construction Materials, Vol. 11, pp. e00250
- Schröfl, Christof; Mechtcherine, Viktor; Gorges, Michaela (2012):** *Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage*. Cement and Concrete Research, Vol. 42, pp. 865-873
- Schubert, Frank (2000):** *Ausbreitungsverhalten von Ultraschallimpulsen in Beton und Schlußfolgerungen für die zerstörungsfreie Prüfung*, PhD (Thesis), TU Dresden
- Schulz, Florian (2003):** *Nachbehandlung von Beton durch Zugabe wasserspeichernder Zusätze*, Diplom (Thesis), FHTW Berlin
- Schurr, Dennis Patrick (2010):** *Monitoring damage in concrete using diffuse ultrasonic coda wave interferometry*, Master of Science in Engineering Science and Mechanics (Thesis), School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology
- Sens-Schönfelder, C.; Ritter, J.; Wegler, U.; Grosse, C.U. (2009).** *Noise and Diffuse Wavefields: Extended Abstracts of the Neustadt Workshop*, In: *Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, Neustadt an der Weinstraße, Germany

- Shah, Surendra P; Popovics, John S; Subramaniam, Kolluru V; Aldea, Corina-Maria (2000):** *New directions in concrete health monitoring technology.* Journal of engineering mechanics, Vol. 126, pp. 754-760
- Shin, Sung Woo; Min, Jinying Zhu Jiyoung; Popovics, John S. (2008):** *Crack Depth Estimation in Concrete Using Energy Transmission of Surface Waves.* Materials Journal, Vol. 105
- Shiotani, T.; Aggelis, D. G. (2007):** *Determination of surface crack depth and repair effectiveness using Rayleigh waves.* 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-9). Berkley, USA
- Sierra-Beltran, M. Guadalupe; Jonkers, H. M.; Schlangen, E. (2014):** *Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair.* Construction and Building Materials, Vol. 67, Part C, pp. 344-352
- Silk, M. G. (1987):** *Changes in ultrasonic defect location and sizing.* NDT International, Vol. 20, pp. 9-14
- Silva, Filipe Bravo; Boon, Nico; De Belie, Nele; Verstraete, Willy (2015):** *Industrial Application of Biological Self-healing Concrete: Challenges and Economical Feasibility.* Journal of Commercial Biotechnology, Vol. 21
- Sisomphon, K; Copuroglu, O; Fraaij, A (2011):** *Application of encapsulated lightweight aggregate impregnated with sodium monofluorophosphate as a self-healing agent in blast furnace slag mortar.* Heron, 56 (1/2)
- Sisomphon, K.; Copuroglu, O.; Koenders, E. A. B. (2012):** *Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive.* Cement and Concrete Composites, Vol. 34, pp. 566-574
- Snieder, R.; Gret, A.; Douma, H.; Scales, J. (2002):** *Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity.* Science (New York, N.Y.), Vol. 295, pp. 2253-2255
- Snieder, Roel (2006):** *The Theory of Coda Wave Interferometry.* Pure and Applied Geophysics, Vol. 163, pp. 455-473
- Snoeck, D.; Dewanckele, J.; Cnudde, V.; De Belie, N. (2016):** *X-ray computed microtomography to study autogenous healing of cementitious materials promoted by superabsorbent polymers.* Cement and Concrete Composites, Vol. 65, pp. 83-93
- Snoeck, D.; Pel, L.; De Belie, N. (2019):** *Comparison of different techniques to study the nanostructure and the microstructure of cementitious materials with and without superabsorbent polymers.* Construction and Building Materials, Vol. 223, pp. 244-253
- Snoeck, D.; Schaubroeck, D.; Dubruel, P.; De Belie, N. (2014):** *Effect of high amounts of superabsorbent polymers and additional water on the workability, microstructure and strength of mortars with a water-to-cement ratio of 0.50.* Construction and Building Materials, Vol. 72, pp. 148-157
- Snoeck, Didier (2016):** *Self-Healing and Microstructure of Cementitious Materials with Microfibres and Superabsorbent Polymers.* PhD (Thesis), Ghent University
- Soltani, Fethi; Goueygou, Marc; Lafhaj, Zoubair; Piwakowski, Bogdan (2013):** *Relationship between ultrasonic Rayleigh wave propagation and capillary porosity in cement paste with variable water content.* NDT & E International, Vol. 54, pp. 75-83
- Son, Hyeong Min; Kim, Ha Yeon; Park, Sol Moi; Lee, Haeng Ki (2018):** *Ureolytic/Non-Ureolytic Bacteria Co-Cultured Self-Healing Agent for Cementitious Materials Crack Repair.* Materials (Basel, Switzerland), Vol. 11, pp. 782
- Song, G.; Gu, H.; Mo, Y. L.; Hsu, T. T. C., et al. (2007):** *Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramic transducers.* Smart Materials and Structures, Vol. 16, pp. 959
- Song, W. J.; Popovics, J. S.; Aldrin, J. C.; Shah, S. P. (2003):** *Measurement of surface wave transmission coefficient across surface-breaking cracks and notches in concrete.* J Acoust Soc Am, Vol. 113, pp. 717-725

- Spinner, S.; Reichard, T. W.; Tefft, W. E. (1960):** *A comparison of experimental and theoretical relations between Young's modulus and the flexural and longitudinal resonance frequencies of uniform bars.* Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 64A, No. 2, p. 147
- Spinner, S.; Valore, R. C. (1958):** *Comparison of theoretical and empirical relations between the shear modulus and torsional resonance frequencies for bars of rectangular cross section.* Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 60, pp. 459-464
- Stuber Geesey, Marcie A.; Aristorenas, Bettina; Ulrich, Timothy J.; Donahue, Carly M. (2019):** *Investigation of the nonlinearity of transducer acoustic couplants for nonlinear elastic measurements.* NDT & E International
- Šutilov, Vladimir A. (1984):** *Ultraschallausbreitung im isotropen Festkörper.* In: Physik des Ultraschalls: Grundlagen, Springer Vienna, Vienna. pp 211-239
- Tan, Linzhen (2019):** *Utilization of lightweight aggregate in the bacteria-based self-healing concrete.* "SARCOS" PhD Meeting. Novi Sad, Serbia
- Tang, Waiching; Kardani, Omid; Cui, Hongzhi (2015):** *Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials – A review.* Construction and Building Materials, Vol. 81, pp. 233-247
- Theobald, Pete; Zeqiri, Bajram; Avison, Janine (2008):** *Couplants and their influence on AE sensor sensitivity.* Journal of acoustic emission, Vol. 26, pp. 91-97
- Thiele, Sebastian; Kim, Jin-Yeon; Qu, Jianmin; Jacobs, Laurence J. (2014):** *Air-coupled detection of nonlinear Rayleigh surface waves to assess material nonlinearity.* Ultrasonics, Vol. 54, pp. 1470-1475
- Tsangouri, E.; Aggelis, D. G.; Van Tittelboom, K.; De Belie, N., et al. (2013):** *Detecting the Activation of a Self-Healing Mechanism in Concrete by Acoustic Emission and Digital Image Correlation.* The Scientific World Journal, Vol. 2013, pp. 10
- Tsangouri, E.; Remy, O.; Boulpaep, F.; Verbruggen, S., et al. (2019a):** *Structural health assessment of prefabricated concrete elements using Acoustic Emission: Towards an optimized damage sensing tool.* Construction and Building Materials, Vol. 206, pp. 261-269
- Tsangouri, Eleni; Aggelis, Dimitrios (2018):** *The Influence of Sensor Size on Acoustic Emission Waveforms—A Numerical Study.* Applied Sciences, Vol. 8, pp. 168
- Tsangouri, Eleni; Gilabert, Francisco A.; De Belie, Nele; Van Hemelrijck, Danny, et al. (2019b):** *Concrete fracture toughness increase by embedding self-healing capsules using an integrated experimental approach.* Construction and Building Materials, Vol. 218, pp. 424-433
- Tsangouri, Eleni; Gilabert, Francisco; Aggelis, Dimitris; De Belie, Nele, et al. (2017):** *Concrete Fracture Energy Increase by Embedding Capsules with Healing Ability: The Effect of Capsules Nature.*
- Tsangouri, Eleni; Karaiskos, Grigorios; Aggelis, Dimitrios G; Deraemaeker, Arnaud, et al. (2015):** *Crack sealing and damage recovery monitoring of a concrete healing system using embedded piezoelectric transducers.* Structural Health Monitoring, Vol. 14, pp. 462-474
- Tsangouri, Eleni; Karaiskos, Grigorios; Deraemaeker, Arnaud; Van Hemelrijck, Danny, et al. (2016):** *Assessment of Acoustic Emission localization accuracy on damaged and healed concrete.* Construction and Building Materials, Vol. 129, pp. 163-171
- Tsangouri, Eleni; Lelon, Jordy; Minnebo, Pieter; Asaue, Hisafumi, et al. (2019c):** *Feasibility study on real-scale, self-healing concrete slab by developing a smart capsules network and assessed by a plethora of advanced monitoring techniques.* Construction and Building Materials, Vol. 228, pp. 116780
- Tziviloglou, E; Wiktor, VAC; Jonkers, HM; Schlangen, E (2015):** *Preparation and optimization of bio-based and light weight aggregate-based healing agent for application in concrete.* Proceedings of the 5th

- International Conference on Self-Healing Materials, ICSHM, Durham, USA, June 22-24, 2015. Extended abstract
- Tziviloglou, E.; Wiktor, V.; Jonkers, H. M.; Schlangen, E. (2016a):** *Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks*. Construction and Building Materials, Vol. 122, pp. 118-125
- Tziviloglou, Eirini; Pan, Zichao; Jonkers, Henk M.; Schlangen, Erik (2017a):** *Bio-based Self-healing Mortar: An Experimental and Numerical Study*. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 15, pp. 536-543
- Tziviloglou, Eirini; Van Tittelboom, Kim; Palin, Damian; Wang, Jianyun, et al. (2016b):** *Bio-Based Self-Healing Concrete: From Research to Field Application*. In: Hager, M. D., van der Zwaag, S., Schubert, U. S. (eds.) Self-healing Materials, Springer International Publishing, Cham. pp 345-385
- Tziviloglou, Eirini; Wiktor, Virginie; Jonkers, Henk M.; Schlangen, Erik (2017b):** *Selection of Nutrient Used in Biogenic Healing Agent for Cementitious Materials*. Frontiers in Materials, Vol. 4
- Van Belleghem, B.; Van Tittelboom, K.; De Belie, N. (2018):** *Efficiency of self-healing cementitious materials with encapsulated polyurethane to reduce water ingress through cracks*. Materiales de Construcción, Vol. 68
- Van Mier, Jan GM (2017):** *Fracture processes of concrete*. CRC press
- Van Stappen, Jeroen; Bultreys, Tom; Gilabert, Francisco A.; Hillewaere, Xander K. D., et al. (2016):** *The microstructure of capsule containing self-healing materials: A micro-computed tomography study*. Materials Characterization, Vol. 119, pp. 99-109
- Van Tittelboom, K.; De Belie, N. (2013):** *Self-Healing in Cementitious Materials-A Review*. Materials (Basel, Switzerland), Vol. 6, pp. 2182-2217
- Van Tittelboom, Kim; De Belie, Nele; Lehmann, Frank; Grosse, Christian U. (2012):** *Acoustic emission analysis for the quantification of autonomous crack healing in concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 28, pp. 333-341
- Van Tittelboom, Kim; De Belie, Nele; Van Loo, Denis; Jacobs, Patric (2011):** *Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent*. Cement and Concrete Composites, Vol. 33, pp. 497-505
- Van Tittelboom, Kim; Tsangouri, Eleni; Van Hemelrijck, Danny; De Belie, Nele (2015):** *The efficiency of self-healing concrete using alternative manufacturing procedures and more realistic crack patterns*. Cement and Concrete Composites, Vol. 57, pp. 142-152
- Van Tittelboom, Kim; Van den Heede, Philip; De Belie, Nele (2018):** *16 - Self-healing concrete with encapsulated polyurethane*. In: Pacheco-Torgal, F., Melchers, R. E., Shi, X., Belie, N. D., Tittelboom, K. V., Sáez, A. (eds.) Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures, Woodhead Publishing. pp 429-466
- Vergara, L.; Gosálbez, J.; Fuente, J. V.; Miralles, R., et al. (2004):** *Measurement of cement porosity by centroid frequency profiles of ultrasonic grain noise*. Signal Processing, Vol. 84, pp. 2315-2324
- Vergara, L.; Miralles, R.; Gosálbez, J.; Juanes, F. J., et al. (2001):** *NDE ultrasonic methods to characterise the porosity of mortar*. NDT & E International, Vol. 34, pp. 557-562
- Vidya Sagar, R.; Raghu Prasad, B. K.; Singh, R. K. (2015):** *Kaiser effect observation in reinforced concrete structures and its use for damage assessment*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 15, pp. 548-557
- Vijay, Kunamineni; Murmu, Meena; Deo, Shirish V. (2017):** *Bacteria based self healing concrete – A review*. Construction and Building Materials, Vol. 152, pp. 1008-1014

- Voigt, Th.; Grosse, Ch. U.; Sun, Z.; Shah, S. P., et al. (2005):** *Comparison of ultrasonic wave transmission and reflection measurements with P- and S-waves on early age mortar and concrete.* Materials and Structures, Vol. 38, pp. 729-738
- Wang, Chuanyong; Sun, Anyu; Yang, Xiaoyu; Ju, Bing-Feng, et al. (2018):** *Numerical simulation of the interaction of laser-generated Rayleigh waves with subsurface cracks.* Applied Physics A, Vol. 124, pp. 613
- Wang, J. Y.; Soens, H.; Verstraete, W.; De Belie, N. (2014):** *Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores.* Cement and Concrete Research, Vol. 56, pp. 139-152
- Weiler, Bernd; Große, C. U. (1995):** *Elastic Constants - Their dynamic measurements and calculation.* Otto-Graf-Journal, Vol. 6
- Wijaya, I. Gede Pasek Suta; Kencanawati, Ni (2014):** *Denoising Acoustic Emission Signal using Wavelet Transforms for Determining the Micro Crack Location Inside of Concrete.* pp 259-268
- Wiktor, Virginie; Jonkers, Henk M. (2011):** *Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete.* Cement and Concrete Composites, Vol. 33, pp. 763-770
- Wu, Bill S.; McLaskey, Gregory C. (2018):** *Broadband Calibration of Acoustic Emission and Ultrasonic Sensors from Generalized Ray Theory and Finite Element Models.* Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 37, pp. 8
- Xu, Jing; Wang, Xianzhi; Wang, Binbin (2018):** *Biochemical process of ureolysis-based microbial CaCO<sub>3</sub> precipitation and its application in self-healing concrete.* Applied Microbiology and Biotechnology, Vol. 102, pp. 3121-3132
- Xue, Caihong; Li, Wengui; Li, Jianchun; Tam, Vivian W. Y., et al. (2018):** *A review study on encapsulation-based self-healing for cementitious materials.* Structural Concrete, Vol. 20
- Yang, Yingzi; Lepech, Michael D.; Yang, En-Hua; Li, Victor C. (2009):** *Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles.* Cement and Concrete Research, Vol. 39, pp. 382-390
- Yang, Yubing; Zhou, Biao; Xie, Xiongyao; Liu, Chao (2018):** *Characteristics and causes of cracking and damage of shield tunnel segmented lining in construction stage – a case study in Shanghai soft soil.* European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 22, pp. s213-s227
- Yiching, Lin; Wen-Chi, Su (1996):** *Use of Stress Waves for Determining the Depth of Surface-Opening Cracks in Concrete Structures.* Materials Journal, Vol. 93
- Yuan, Maodan; Zhang, Jianhai; Song, Sung-Jin; Kim, Hak-Joon (2015):** *Numerical simulation of Rayleigh wave interaction with surface closed cracks under external pressure.* Wave Motion, Vol. 57, pp. 143-153
- Zemskov, Serguey V.; Jonkers, Henk M.; Vermolen, Fred J. (2011):** *Two analytical models for the probability characteristics of a crack hitting encapsulated particles: Application to self-healing materials.* Computational Materials Science, Vol. 50, pp. 3323-3333
- Zhang, Haijiang; Rowe, Charlotte; Thurber, Clifford (2003):** *Automatic P-Wave Arrival Detection and Picking with Multiscale Wavelet Analysis for Single-Component Recordings.* Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, pp. 1904-1912
- Zhang, Jian; Deng, Hongwei; Taheri, Abbas; Deng, Junren, et al. (2018):** *Effects of Superplasticizer on the Hydration, Consistency, and Strength Development of Cemented Paste Backfill.* Minerals, Vol. 8, pp. 381
- Zhang, Yuxiang; Abraham, Odile; Grondin, Frédéric; Loukili, Ahmed, et al. (2012):** *Study of stress-induced velocity variation in concrete under direct tensile force and monitoring of the damage level by using thermally-compensated Coda Wave Interferometry.* Ultrasonics, Vol. 52, pp. 1038-1045

- Zhang, Yuxiang; Tournat, Vincent; Abraham, Odile; Durand, Olivier, et al. (2017):** *Nonlinear coda wave interferometry for the global evaluation of damage levels in complex solids.* Ultrasonics, Vol. 73, pp. 245-252
- Zhao, Guoqi; Zhang, Di; Zhang, Lu; Wang, Ben (2018):** *Detection of Defects in Reinforced Concrete Structures Using Ultrasonic Nondestructive Evaluation with Piezoceramic Transducers and the Time Reversal Method.* Sensors, Vol. 18, pp. 4176
- Zhao, Mingjie; Nie, Zhichao; Wang, Kui; Liu, Pan, et al. (2019):** *Nonlinear ultrasonic test of concrete cubes with induced crack.* Ultrasonics, Vol. 97, pp. 1-10
- Zhu, J.; Popovics, J. S. (2005):** *Non-contact imaging for surface-opening cracks in concrete with air-coupled sensors.* Materials and Structures, Vol. 38, pp. 801-806
- Zhu, Yu; Yang, Yingzi; Yao, Yan (2012):** *Autogenous self-healing of engineered cementitious composites under freeze-thaw cycles.* Construction and Building Materials, Vol. 34, pp. 522-530



# Appendix

## A. Lokalisierungsalgorithmen mit synthetischen Daten

Für einen quantitativen Vergleich einzelner Lokalisierungsergebnisse mit dem Geiger- und Bancroft-Algorithmus wurden synthetische Laufzeitdifferenzen zwischen einem Quellherdraster an der Testkörperoberfläche und 14 definierten Sensorpositionen vorgegeben. Dieses Schema entspricht dem Versuchsaufbau in Kapitel 6.2.4. Die Differenzen basieren auf einer variablen Schallausbreitungsgeschwindigkeit zwischen 4650-4750 m/s, wobei zwei Sensoren stark fehlerhafte Ersteinsätzen aufweisen ( $4700 \text{ m/s} \gg v \gg 4700 \text{ m/s}$ ). Dieses Vorgehen soll ein realistisches Szenario widerspiegeln, bei dem z. B. SE-Empfänger während der Prüfung ausfallen oder die homogene Schallwellenausbreitung aufgrund von Inhomogenitäten unterbrochen wird. 42 definierte SE-Quellherde à 10 Einzelevents sind über drei Messreihen entlang der Abszissen-, Ordinaten- und Applikatenachse mit 2 cm bzw. 1 cm Rasterabständen verteilt. Die Lokalisierungsergebnisse sind in Abbildung 0-1 als dreidimensionale Ansicht sowie die entsprechenden Mislokalisationsvektoren in Abbildung 0-2 dargestellt. Der Fehlerbalken repräsentiert die Standardabweichung über die jeweils 10 Einzelevents pro Quellherd.

Während der Bancroft-Algorithmus alle 42 SE-Quellherde detektiert, kommt es beim iterativen Geiger-Verfahren zu mehrfachen Divergenzen für Rasterpunkte in den Anfangs- und Endbereichen der Abszissenachse sowie fast vollständig entlang der Applikate. Kommt es zu einer Konvergenz, führt das Ergebnis fast<sup>34</sup> durchgehend zu einer erfolgreichen Quellherdlokalisierung. Bei einer erfolgreichen Lokalisierung sind die Mislokalisationsvektoren beider Verfahren mit leichten Schwankungen innerhalb der Standardabweichung nahezu identisch.

Abbildung 0-3 zeigt die parallel zum Mislokalisationsvektor bestimmten Residuen aus den Laufzeitdifferenzen nach Gl. 4-13. Bei der Betrachtung der ersten drei Residuen der Messpunkte auf der Applikatenachse fällt auf, dass diese um ein zehner Potenz größer sind als die darauffolgenden, bei gleichbleibendem Mislokalisationsvektor. Grund dafür ist, dass für die ersten drei Quellherde eine Fehleranalyse mit zusätzlichem fehlerhaften SE-Sensoren durchgeführt wurde. Die automatisiert bestimmte Ergebnismenge aller Permutationslösungen, welche den Massenschwerpunkt schlussendlich

---

<sup>34</sup> Ausnahme: Applikatenachse für  $z=0,09 \text{ m}$ .

definieren soll, beinhaltet ebenfalls Ereignisse, welche aus einer Sensorkombination mit fehlerhaftem Ersteinsatz resultieren. Da alle einflussgebenden Sensoren mit in die Fehleranalyse einfließen, bildete sich ein verhältnismäßig großer Gesamtfehler. Eine Beurteilung des Lokalisierungsergebnisses, ausschließlich anhand der Kanalresiduen, ist somit nicht zuverlässig. Da bei einer SEA die Quellherde bzw. die Herzzeiten meist unbekannt sind, dient die Betrachtung der Residuen innerhalb der Interpretation der Lokalisierungsergebnisse nur als zusätzlicher Anhaltspunkt.

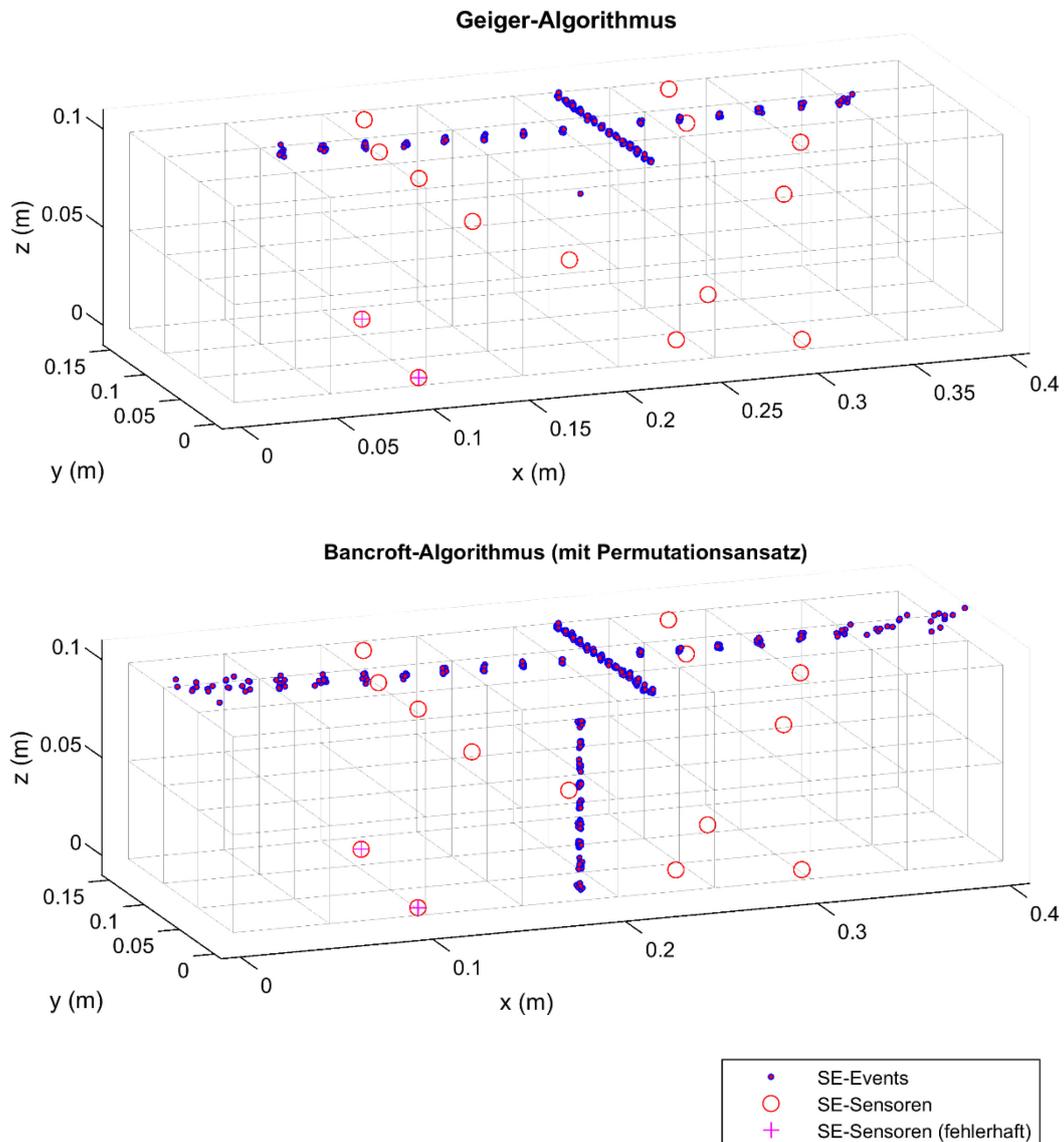


Abbildung 0-1: Dreidimensionale Darstellung der Lokalisierungsergebnisse synthetisch generierter Ankunftszeiten innerhalb der SEA mit dem Geiger- und Bancroft-Verfahren.

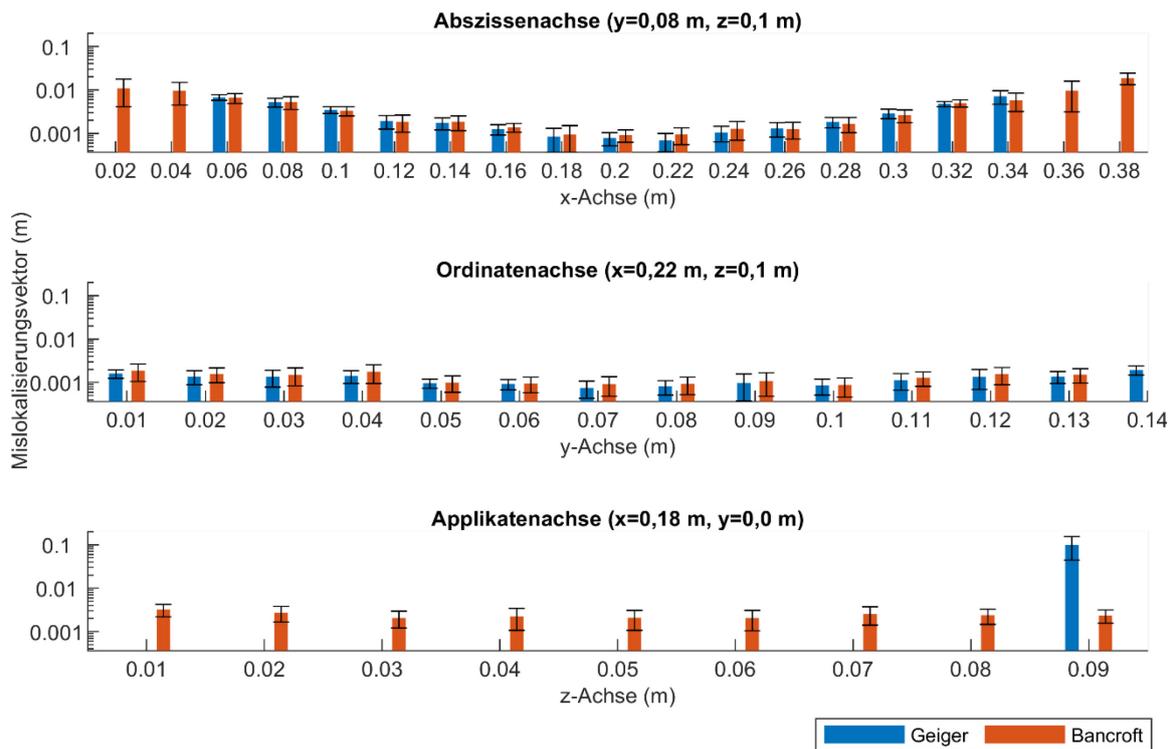


Abbildung 0-2: Mislokalisierungsvektoren zu definierten Quellherden aus der Berechnung mit synthetischen Ankunftszeiten innerhalb der SEA mit dem Geiger- und Bancroft-Verfahren.

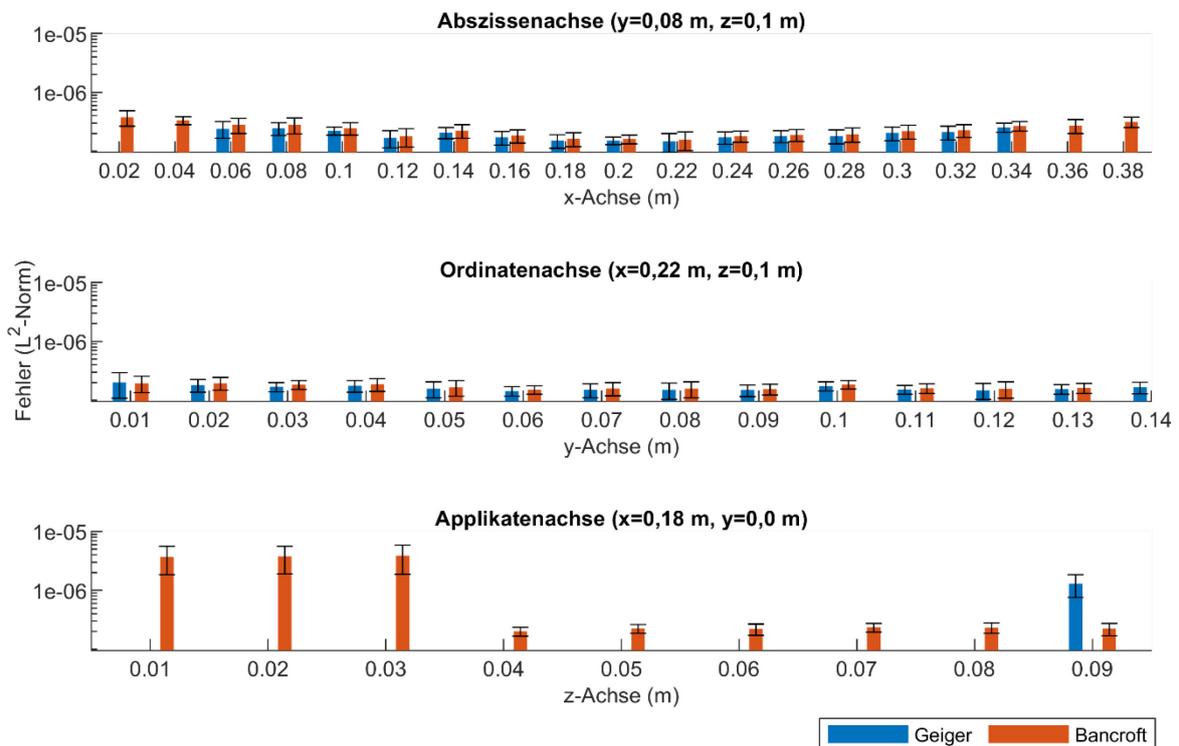


Abbildung 0-3: Bestimmung des Gesamtfehlers nach  $L^2$ -Norm (RES) zu definierten Quellherden aus der Berechnung mit synthetischen Ankunftszeiten innerhalb der SEA mit dem Geiger- und Bancroft-Verfahren.

## B. Mörteltestkörper

Tabelle 0-1: 3-P-Biegeversuch für initiale Rissbildung der Mörteltestkörper (Mikro-Ebene).

	<b>Belastung</b>	<b>Belastungsende</b>	<b>Haltezeit (s)</b>
<b>Kurve 1</b>	0,01 kN/s	0,1 kN	5
<b>Kurve 2</b>	0,003 mm/s	0,8 mm	60
<b>Kurve 3 (entlasten)</b>	10 mm/min	0 mm	180

Tabelle 0-2: 3-P-Biegeversuch nach Heilung der Mörteltestkörper (Mikro-Ebene).

	<b>Belastung</b>	<b>Belastungsende</b>	<b>Haltezeit (s)</b>
<b>Kurve 1</b>	0,01 kN/s	0,1 kN	5
<b>Kurve 2</b>	0,003 mm/s	0,4 mm	60
<b>Kurve 3 (entlasten)</b>	10 N/s	0 N	180

Tabelle 0-3: Einzelkennwerte der Kraftaufzeichnung für „SLV“-Mörteltestkörper.

<b>SLV</b>					
		<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>Ref</b>
<b>Anfangs- belastung</b>	Kraft bei Start Rissinitiierung (N)	233	256	240	
	max. Kraft (N)	3198	2912	3282	
	Rissöffnung bei max. Kraft (mm)	0,007	0,007	0,008	
	Zeitpunkt max. Kraft (s)	58,76	59,26	58,56	
	Rissöffnung, entlastet (mm)	0,21	0,215	0,211	
<b>Wieder- belastung</b>	Kraft bei Start Rissinitiierung (N)	191	181	159	235
	max. Kraft (N)	3993	4403	2788	3100
	Rissöffnung bei max. Kraft (mm)	0,023	0,024	0,018	0,008
	Zeitpunkt max. Kraft (s)	57,3	58,02	55,24	62,32
	Rissöffnung, entlastet (mm)	0,193	0,258	0,111	0,166

Tabelle 0-4: Einzelkennwerte der Kraftaufzeichnung für „Liapor ohne BAC (+20)“-Mörteltestkörper.

Liapor ohne BAC (+20)					
		I	II	III	Ref
<b>Anfangs- belastung</b>	Kraft bei Start Rissinitiierung (N)	123	109	139	
	max. Kraft (N)	2068	2301	2226	
	Rissöffnung bei max. Kraft (mm)	0,014	0,012	0,013	
	Zeitpunkt max. Kraft (s)	57,36	58,14	57,6	
	Rissöffnung, entlastet (mm)	0,239	0,218	0,172	
<b>Wieder- belastung</b>	Kraft bei Start Rissinitiierung (N)	38	41	48	127
	max. Kraft (N)	379	461	272	1903
	Rissöffnung bei max. Kraft (mm)	0,391	0,395	0,399	0,008
	Zeitpunkt max. Kraft (s)	154,3	156	157,08	161,08
	Rissöffnung, entlastet (mm)	0,037	0,066	0,071	0,132

Tabelle 0-5: Einzelkennwerte der Kraftaufzeichnung für „Liapor mit BAC (+20)“-Mörteltestkörper.

Liapor mit BAC (+20)					
		I	II	III	Ref
<b>Anfangs- belastung</b>	Kraft bei Start Rissinitiierung (N)	93	95	138	
	max. Kraft (N)	2011	1822	1731	
	Rissöffnung bei max. Kraft (mm)	0,014	0,013	0,016	
	Zeitpunkt max. Kraft (s)	59,2	57,54	59,64	
	Rissöffnung, entlastet (mm)	0,18	0,167	0,193	
<b>Wieder- belastung</b>	Kraft bei Start Rissinitiierung (N)	25	27	29	98
	max. Kraft (N)	447	363	508	1659
	Rissöffnung bei max. Kraft (mm)	0,394	0,292	0,395	0,008
	Zeitpunkt max. Kraft (s)	155,44	119,54	155,86	135,96
	Rissöffnung, entlastet (mm)	0,032	0,079	0,059	0,106

Tabelle 0-6: Einzelkennwerte der Kraftaufzeichnung für „SAP 2,25 gr. (+40)“-Mörteltestkörper.

SAP 2,25 gr. (+40)					
		I	II	III	Ref
<b>Anfangs- belastung</b>	Kraft bei Start Rissinitiierung (N)	249	242	202	
	max. Kraft (N)	2983	3651	3406	
	Rissöffnung bei max. Kraft (mm)	0,009	0,011	0,009	
	Zeitpunkt max. Kraft (s)	57,72	58,88	58,04	
	Rissöffnung, entlastet (mm)	0,221	0,263	0,215	
<b>Wieder- belastung</b>	Kraft bei Start Rissinitiierung (N)	68	52	64	211
	max. Kraft (N)	755	363	789	2210
	Rissöffnung bei max. Kraft (mm)	0,4	0,398	0,4	0,012
	Zeitpunkt max. Kraft (s)	158,78	157,42	158,36	172,7
	Rissöffnung, entlastet (mm)	0,037	0,047	0,042	0,119

Tabelle 0-7: Einzelkennwerte der Kraftaufzeichnung für „SAP 4,5 gr. (+110)“-Mörteltestkörper.

SAP 4,5 gr. (+110)					
		I	II	III	Ref
<b>Anfangs- belastung</b>	Kraft bei Start Rissinitiierung (N)	187	192	118	
	max. Kraft (N)	2786	2953	2681	
	Rissöffnung bei max. Kraft (mm)	0,01	0,01	0,012	
	Zeitpunkt max. Kraft (s)	58,48	58,3	58,32	
	Rissöffnung, entlastet (mm)	0,226	0,209	0,207	
<b>Wieder- belastung</b>	Kraft bei Start Rissinitiierung (N)	59	58	62	238
	max. Kraft (N)	571	581	514	1878
	Rissöffnung bei max. Kraft (mm)	0,4	0,394	0,399	0,016
	Zeitpunkt max. Kraft (s)	158,58	156,14	157,72	170,36
	Rissöffnung, entlastet (mm)	0,041	0,048	0,048	0,135

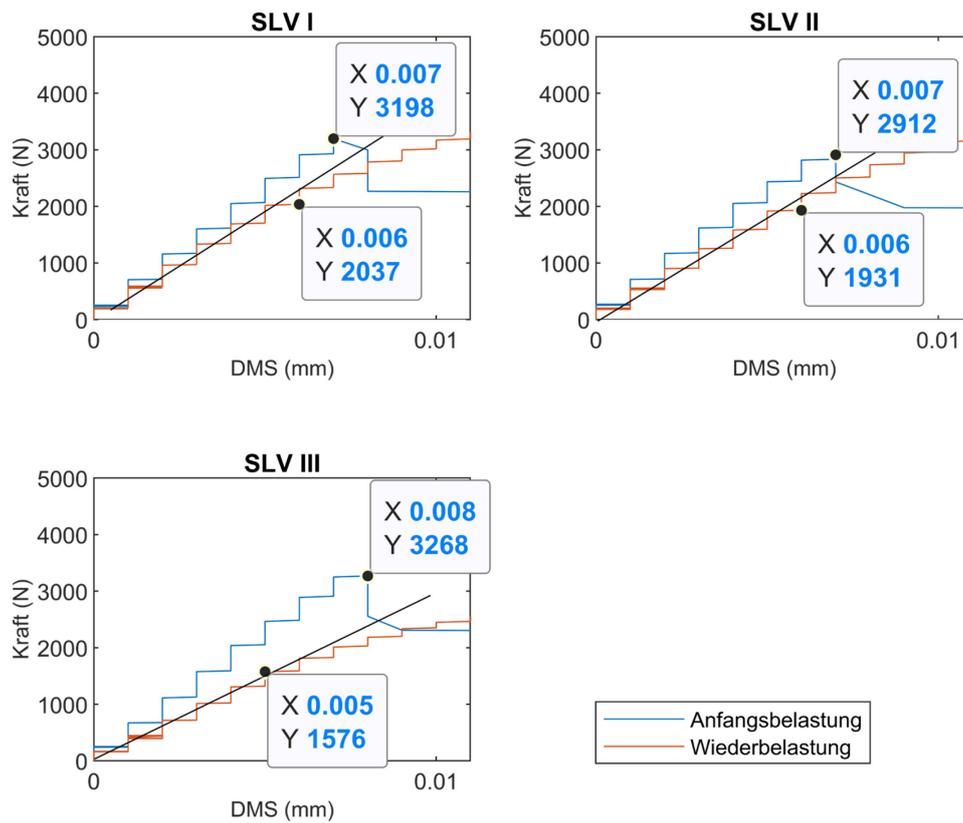


Abbildung 0-4: Detaillierter Kraft-Dehnungs- (Rissöffnungs-) verlauf für Mörteltestkörper „SLV I-III“ im Bereich von 0,0 bis 0,011 mm nach manueller Verfüllung mit dem PU „SLV“. Die schwarze Gerade innerhalb der Wiederbelastungskurve gibt das lineare Kraft-Dehnungsverhältnis des Polymers wieder. Die Dehnung der zementgebundenen Mörtelmatrix wird während der initialen Belastung als linear angenommen. Die entsprechenden Maximalwerte (X: max. Dehnung, Y: max. Kraft) sind über die „Data-Tips“ gegeben.

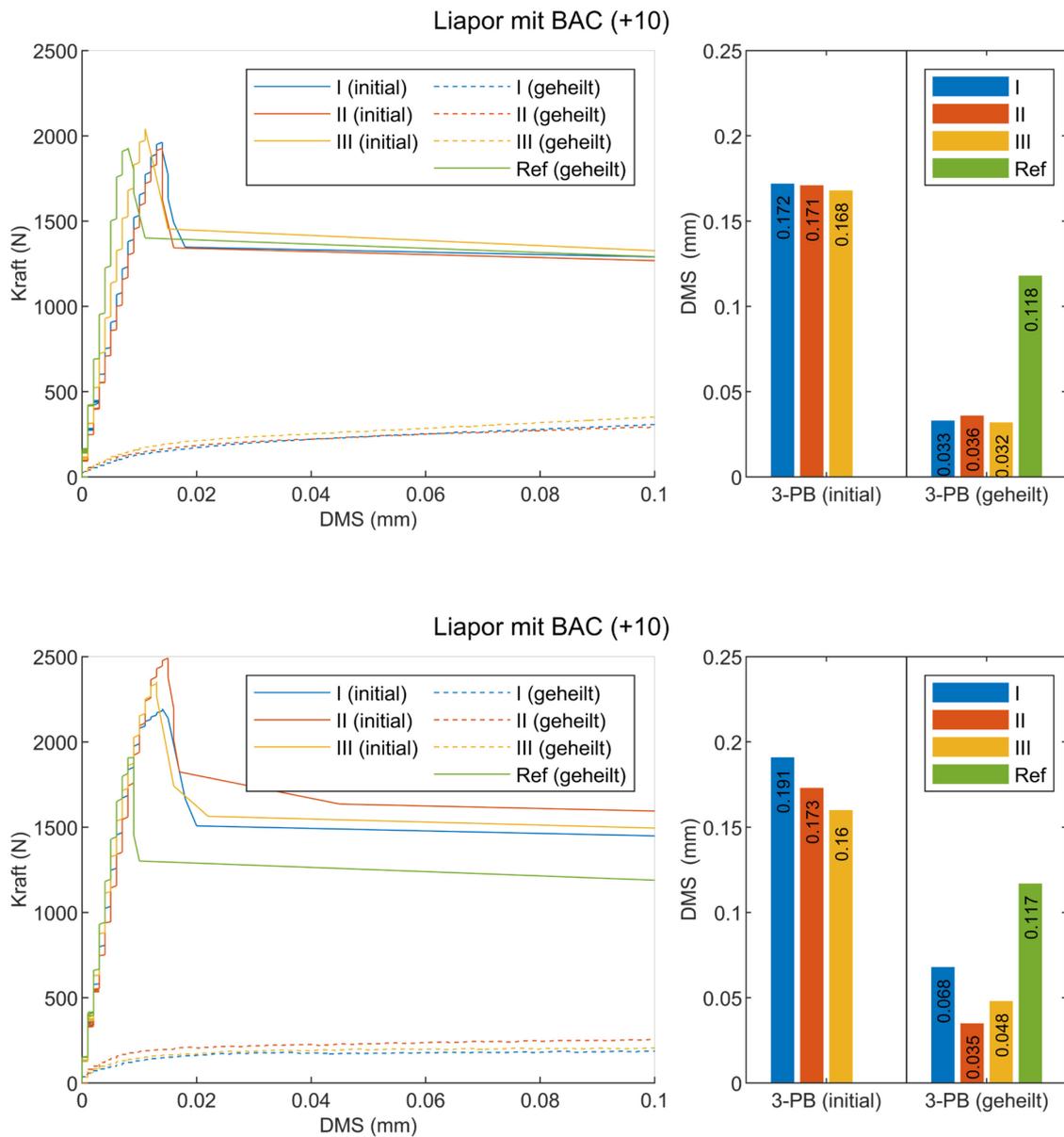


Abbildung 0-5: Detaillierter Kraft-Dehnungs- (Rissöffnungs-) verlauf für bakterienbasierte Mörteltestkörper (oben) sowie Referenzprüfserie (unten) mit 10 gr. zusätzlichem Wasser des initialen 3-Punkt-Biegeversuch (=Anfangsbelastung) und nach 6-wöchigem Nass- Trockenzyklus mit anschließender Trocknung (=Wiederbelastung). Das Balkendiagramm gibt die finalen Rissweiten in den jeweiligen Zuständen wider.

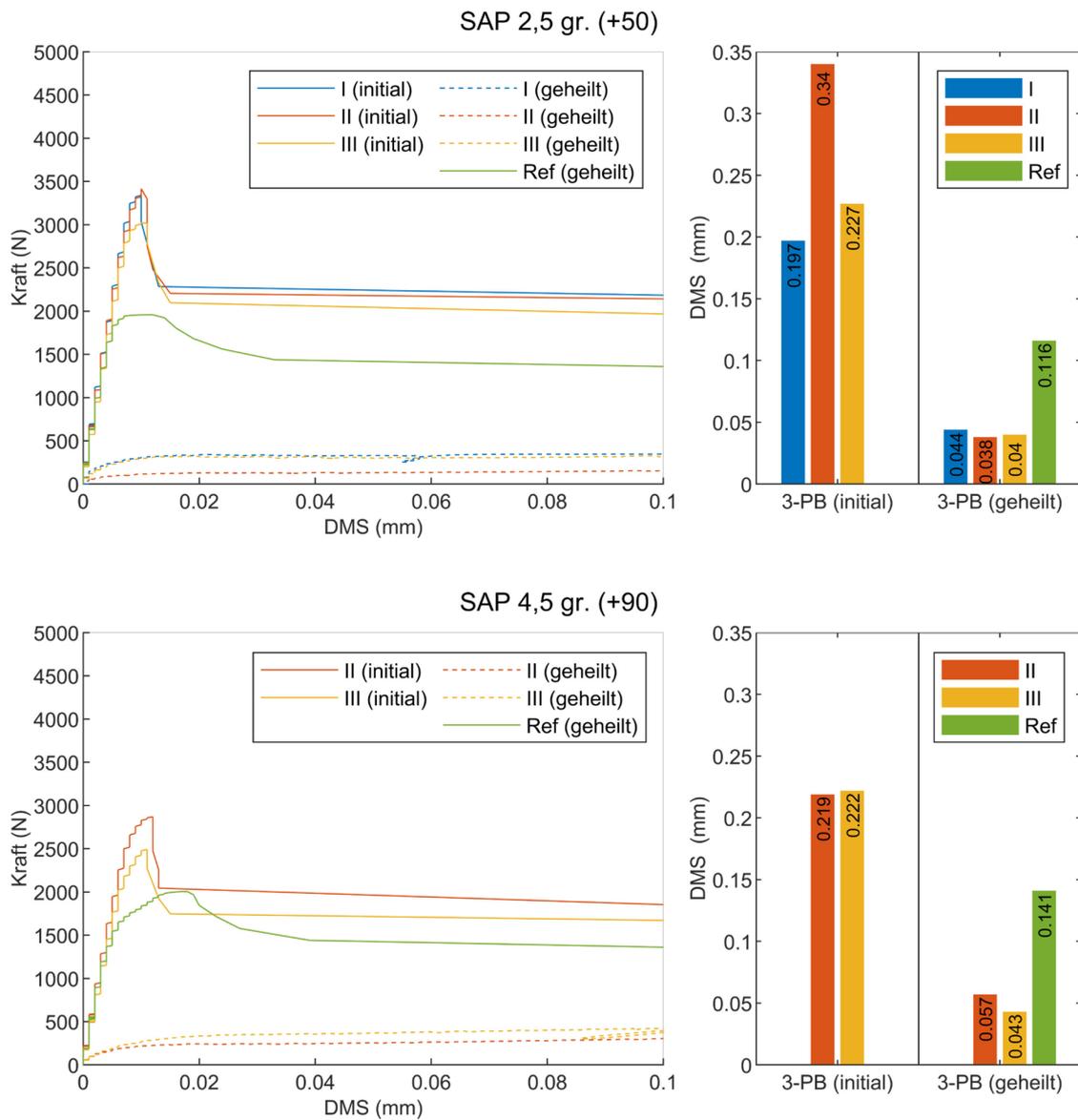


Abbildung 0-6: Detaillierter Kraft-Dehnungs- (Rissöffnungs-) verlauf für Mörteltestkörper mit 2,25 gr. Hydrogelgranulat und 50 gr. zusätzlichem Wasser (oben) sowie Mörtelprismen mit 4,5 gr. Hydrogelgranulat und 90 gr. zusätzlichem Wasser (unten) des initialen 3-Punkt-Biegeversuch (=Anfangsbelastung) und nach 6-wöchigem Nass-Trockenzyklus mit anschließender Trocknung (=Wiederbelastung). Das Balkendiagramm gibt die finalen Rissweiten in den jeweiligen Zuständen wider.

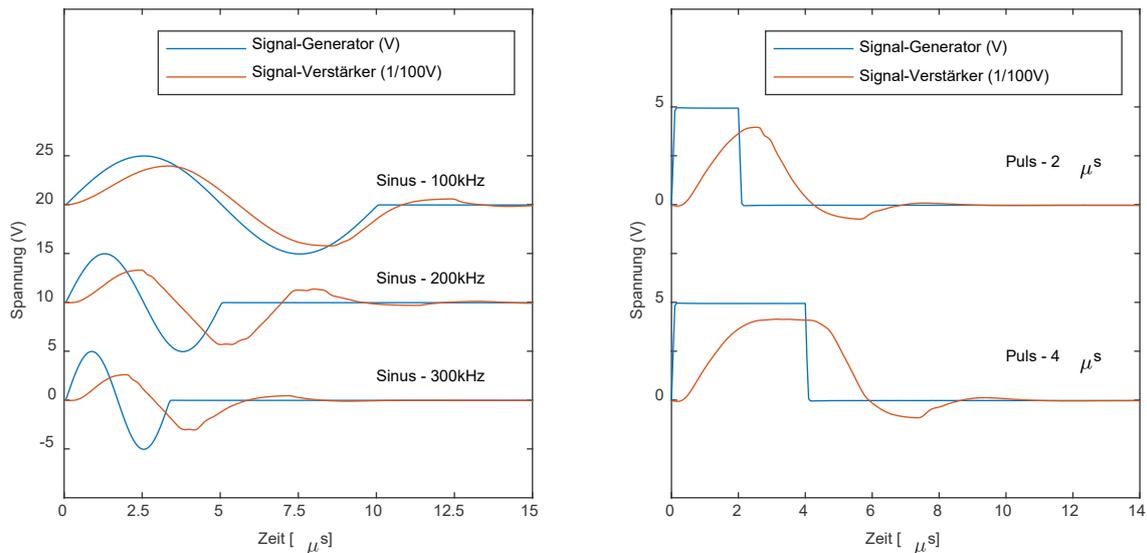


Abbildung 0-7: Anregerimpulse für Mörteltestkörper. Die analoge Verstärkung des konfigurierten Impulssignals (blau) über den Messverstärker Trek Model PZD350A führte zu einer Signalformveränderung (rot).

Tabelle 0-8: Einstellungen für die Digitalisierung der analogen Schwingungen sowie der Berechnung der Frequenzantwortfunktion in LMS Test.Lab Software für LMS SCADAS Mobile.

<b>maximale Frequenzbandweite <math>f_{max}</math></b>	<b>25600 Hz</b>
<b>Sample-Länge</b>	2048 (0,04 s)
<b>Frequenzauflösung <math>\Delta f</math></b>	25 Hz
<b>Roll-Off Parameter (Anti-Aliasing-Filter)</b>	3 dB
<b>Fensterung Eingangssignal</b>	Force-exponential: 5 %
<b>Fensterung Antwortsignal</b>	Exponential

## C. Betontestkörper MEYCO

Tabelle 0-9: Mess- und Systemparameter für ToFD-Verfahren zur Bestimmung der Risstiefe für Betontestkörper mit „MEYCO“.

Parameter	Einstellung	Messsystem
Verstärkung (dB)	60	Vorverstärker (8-Kanal Breitbandvorverstärker SmartPreDig, SMARTMOTE)
High-pass (kHz)	10	Hardware-Filter (8-Kanal Breitbandvorverstärker SmartPreDig, SMARTMOTE)
Low-pass (MHz)	1	
Abtastrate (MHz)	20	Transientenrekorder - TranAX (Elsys AG)
Signallänge (Samples)	801000	
Impulse per Test (Signalstapelung)	5	
Impulsspannung (V)	800	US-Generator (USG 40, Geotron Elektronik)
Geber-Frequenz (kHz)	80	US-Generator (USG 40, Geotron Elektronik)

Tabelle 0-10: Mess- und Systemparameter für Ultraschall in-situ-Messung zur Bestimmung des Verfüll- und Aushärteverhaltens von Betontestkörper mit „MEYCO“.

Parameter	Einstellung	Messsystem
Verstärkung (dB)	-	FreshCon-System (SMARTMOTE)
High-pass (kHz)	-	
Low-pass (MHz)	-	
Abtastrate (MHz)	10	
Signallänge (Samples)	10241	
Signal-Interval (1/min)	6	
Impulsspannung (V)	800	
Pulsweite (µs)	5 (Rechteck-Puls)	Matlab
High-Pass-Softwarefilter (kHz)	4	

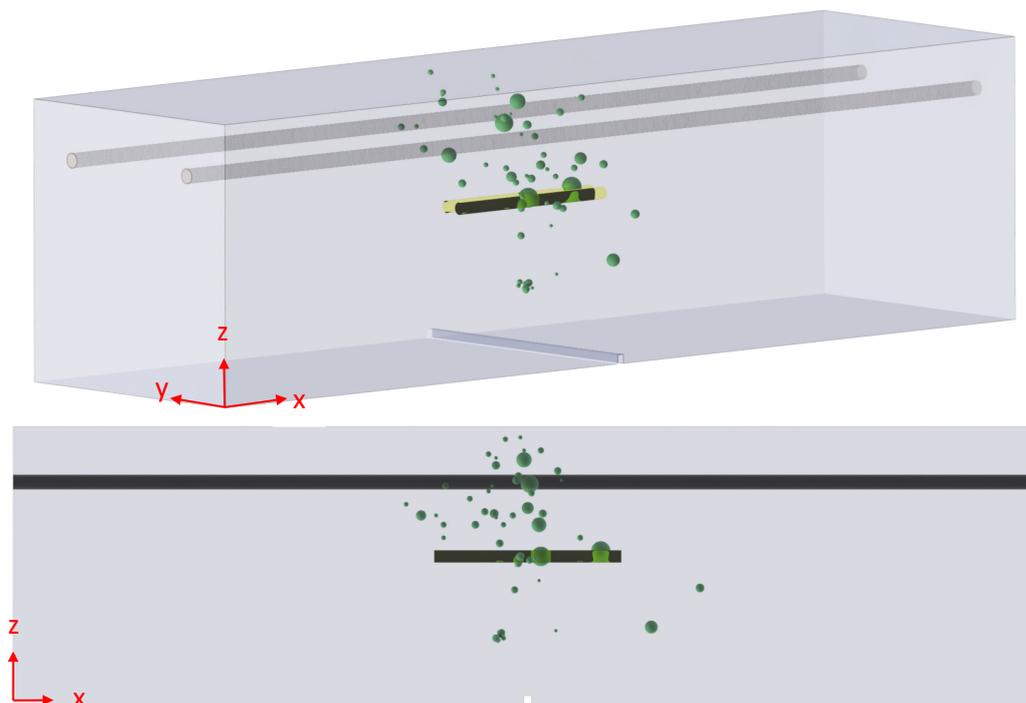
Tabelle 0-11: Sensorkoordinaten für SEA („wiederbelastet“) innerhalb der „MEYCO“-Betontestkörperserie.

Sensor	MEYCO I			MEYCO II		
	x (m)	y (m)	z (m)	x (m)	y (m)	z (m)
1	0.123	0.000	0.045	0.110	0.000	0.025
2	0.175	0.000	0.127	0.175	0.000	0.127
3	0.385	0.000	0.023	0.385	0.000	0.023
4	0.383	0.000	0.133	0.392	0.000	0.121
5	0.145	0.040	0.150	0.145	0.037	0.150
6	0.148	0.110	0.150	0.148	0.115	0.150
7	0.354	0.050	0.150	0.354	0.034	0.150
8	0.412	0.135	0.150	0.424	0.115	0.150
9	0.385	0.150	0.105	0.385	0.150	0.120
10	0.345	0.150	0.026	0.367	0.150	0.026
11	0.170	0.150	0.021	0.192	0.150	0.021
12	0.017	0.150	0.123	0.188	0.150	0.123
13	0.177	0.034	0.000	0.177	0.034	0.000
14	0.378	0.070	0.000	0.378	0.070	0.000
15	0.225	0.130	0.000	0.225	0.130	0.000
	<b>MEYCO III</b>			<b>MEYCO IV</b>		
1	0.123	0.000	0.025	0.140	0.000	0.025
2	0.194	0.000	0.127	0.194	0.000	0.127
3	0.385	0.000	0.023	0.403	0.000	0.023
4	0.383	0.000	0.133	0.400	0.000	0.121
5	0.145	0.022	0.150	0.145	0.022	0.150
6	0.148	0.037	0.150	0.148	0.130	0.150
7	0.354	0.126	0.150	0.354	0.034	0.150
8	0.424	0.130	0.150	0.395	0.125	0.150
9	0.385	0.150	0.120	0.405	0.150	0.034
10	0.370	0.150	0.047	0.377	0.150	0.121
11	0.192	0.150	0.047	0.210	0.150	0.129
12	0.188	0.150	0.123	0.167	0.150	0.025
13	0.177	0.034	0.000	0.175	0.035	0.000
14	0.378	0.070	0.000	0.375	0.070	0.000
15	0.225	0.130	0.000	0.230	0.123	0.000

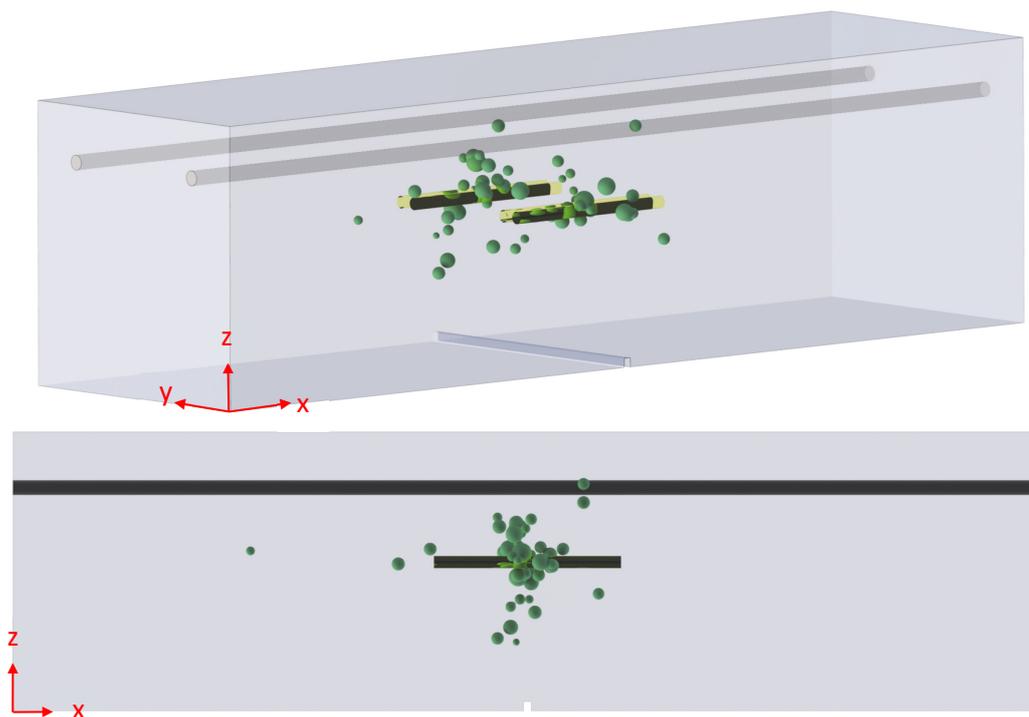
Tabelle 0-12: Mess- und Systemeinstellungen für SEA innerhalb der „MEYCO“-Betontestkörperserie.

<b>Anzahl an Sensoren</b>	<b>15</b>
<b>Verstärkung</b>	60 dB
<b>Hochpass/Tiefpass-Filter</b>	10 kHz/1 MHz
<b>Software</b>	Elsys TranAX (ECR Multichannel)
<b>Abtastrate</b>	5 MHz („MEYCO II“: 2,5 MHz)
<b>Pretrigger</b>	500 S
<b>Posttrigger</b>	5 kS
<b>HoldOff</b>	5.5 kS
<b>Spannungsbereich</b>	20 V
<b>Threshold (Slew Rate Trigger)</b>	0,2 V/10 S („MEYCO II“: 0,6 V/5 S)

MEYCO I



MEYCO II



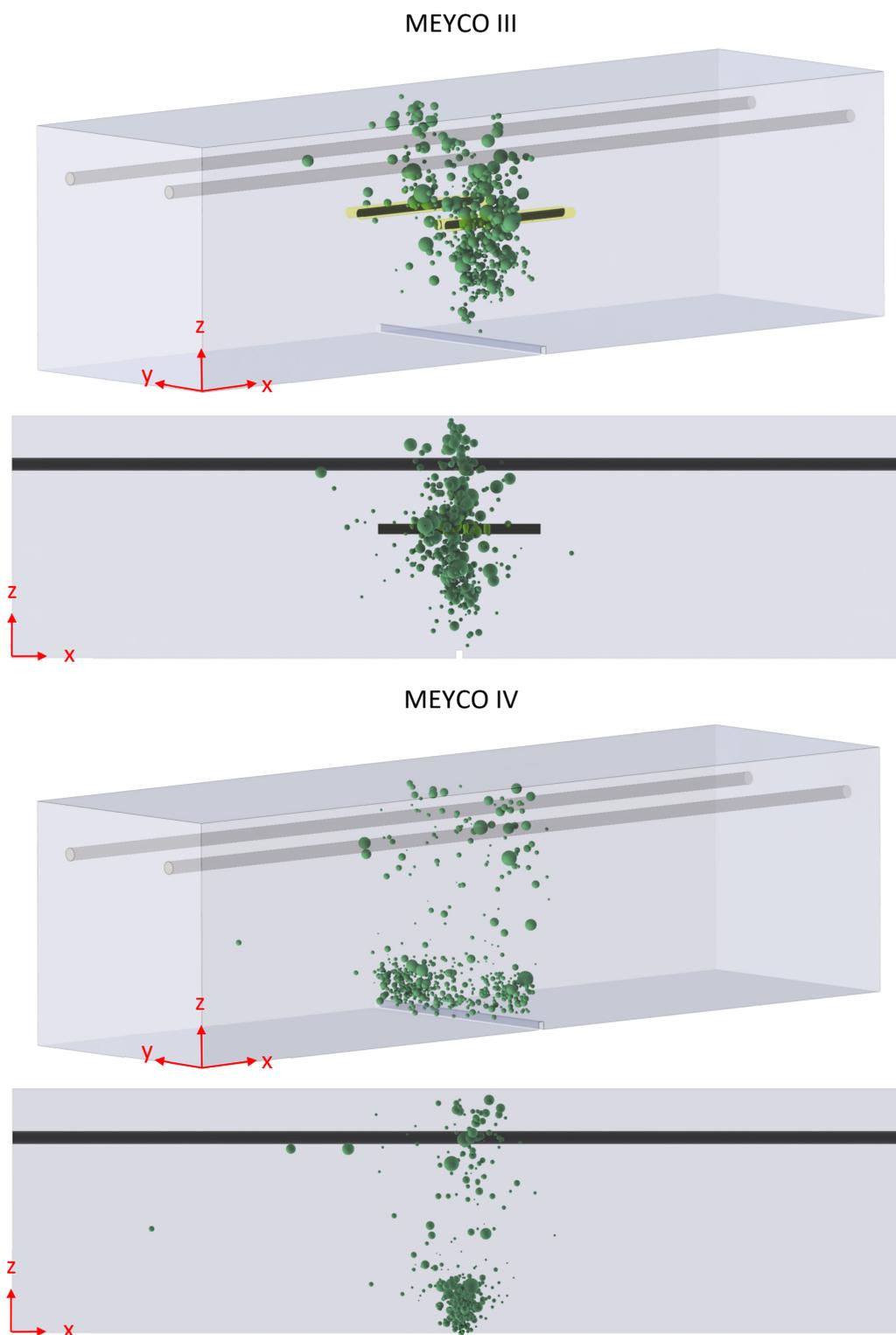


Abbildung 0-8: 3D-Lokalisierungsdarstellung der selektierten SE-Events der einzelnen „MEYCO“-Testkörper aus Kapitel 6.1.5.. Darstellung mit Bewehrungsstäben und individueller Glaskapillarenanordnung. Die Größe der Kugeln steht in einem logarithmischen Bezug zur gemittelten Energie über alle relevanten Sensoren je SE-Event.

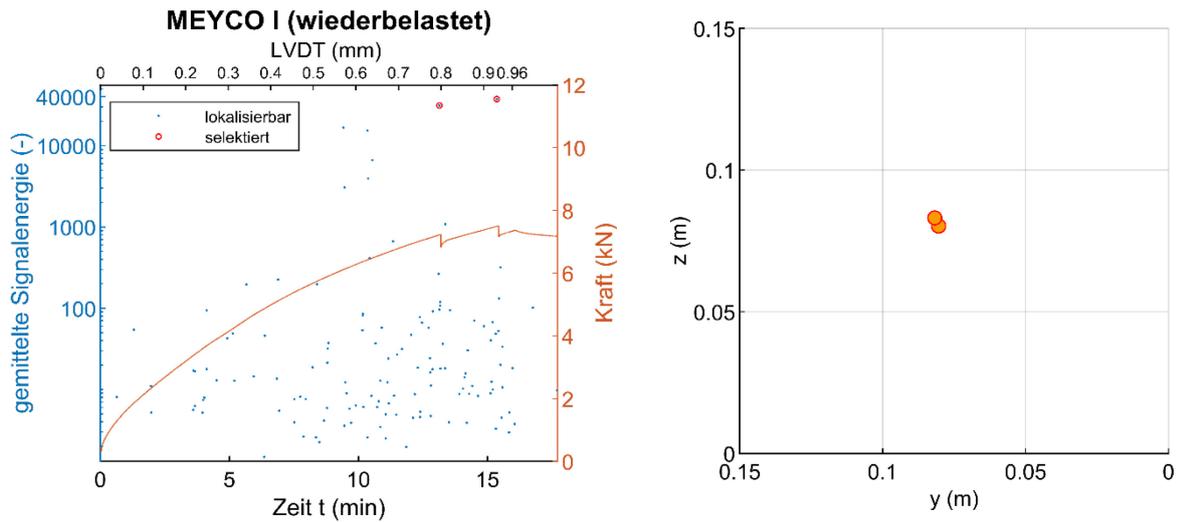


Abbildung 0-9: Zeitabhängiges SE-Auftreten sowie des Kraftkurvenverhaltes während des wiederholten rissweitengesteuerten 3-P-Biegeversuchs von Testkörper „MEYCO I“ (links). Die Selektierung der SE-Events (Bancroft-Verfahren) über die gemittelte Signalenergie (rot markiert) führt zu einer erneuten Lokalisierung der eingebetteten Glaskapillaren im mittigen Testkörperbereich (rechts).

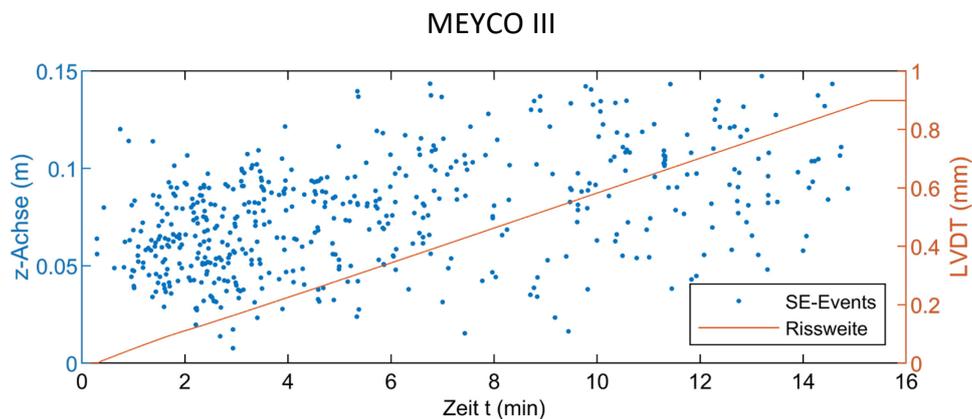


Abbildung 0-10: Zeitabhängiges SE-Auftreten mit entsprechenden Lokalisierungsergebnisse in z-Achse für „MEYCO III“.

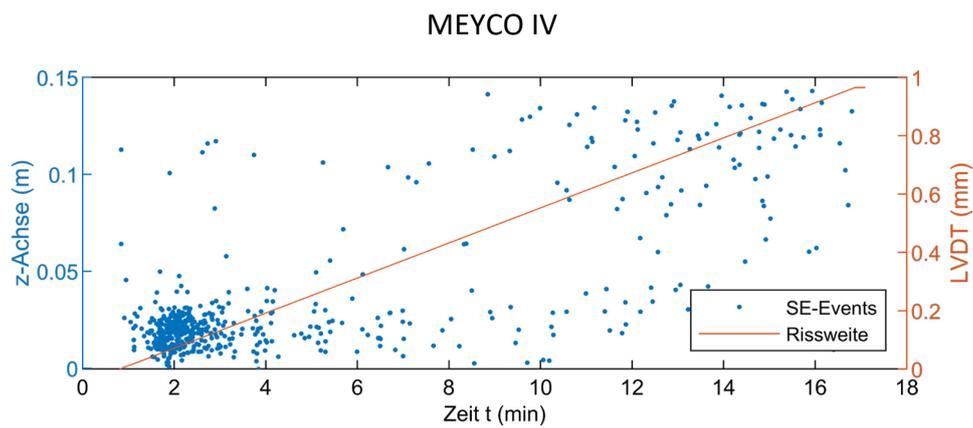


Abbildung 0-11: Zeitabhängiges SE-Auftreten mit entsprechenden Lokalisierungsergebnisse in z-Achse für „MEYCO IV“.

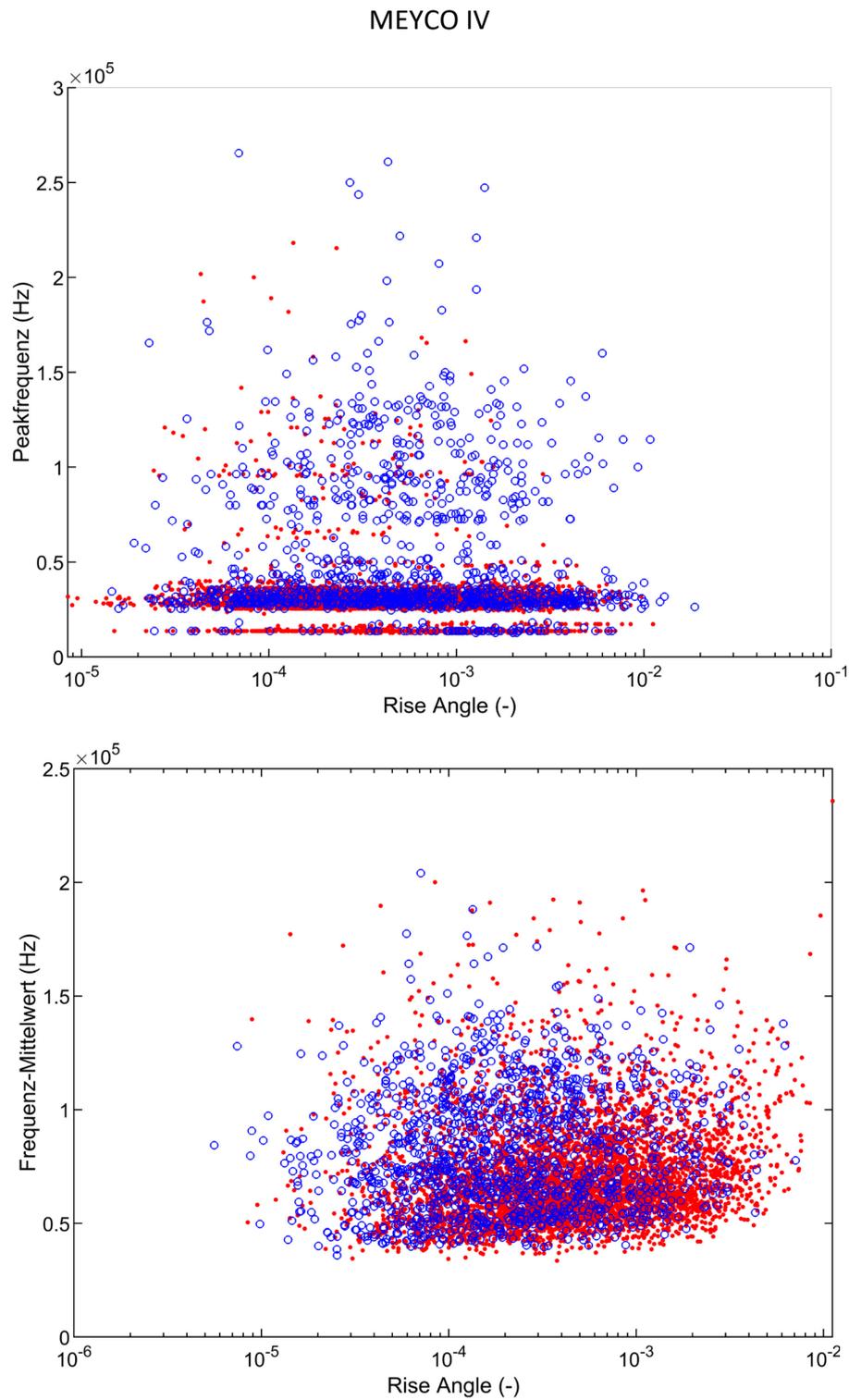


Abbildung 0-12: Selektierung der einzelnen Sensorsignale je SE-Event (kein Clipping) nach unterschiedlichen frequenzbasierten Charakteristika (oben: Peakfrequenz, unten: Frequenz-Mittelwert) des zweiten Biegeversuchs (nach Abschluss Heilungsphase). Rote Punkte zeigen Events mit  $t < 4$  min und  $z < 0,05$  m, blaue Kreise repräsentieren Events mit  $t > 4$  min und  $z > 0,05$  m.

## D. Betontestkörper SLV

Tabelle 0-13: Mess- und Systemparameter für ToFD-Verfahren zur Bestimmung der Risttiefe für Betontestkörper mit „SLV“.

Parameter	Einstellung	Messsystem
Verstärkung (dB)	48	Vorverstärker (8-Kanal Breitbandvorverstärker SmartPreDig, SMARTMOTE)
High-pass (kHz)	10	Hardware-Filter (8-Kanal Breitbandvorverstärker SmartPreDig, SMARTMOTE)
Low-pass (MHz)	1	
Abtastrate (MHz)	5	Transientenrekorder - TranAX (Elsys AG)
Signallänge (Samples)	26000	
Impulse per Test (Signalstapelung)	50	
Impulsspannung (V)	800	US-Generator (USG 40, Geotron Elektronik)
Geber-Frequenz (kHz)	350	US-Generator (USG 40, Geotron Elektronik)

Tabelle 0-14: Mess- und Systemparameter für Ultraschall in-situ-Messung zur Bestimmung des Verfüll- und Aushärteverhaltens von Betontestkörper mit „SLV“.

Parameter	Einstellung	Messsystem
Verstärkung (dB)	-	FreshCon-System (SMARTMOTE)
High-pass (kHz)	-	
Low-pass (MHz)	-	
Abtastrate (MHz)	10	
Signallänge (Samples)	10241	
Signal-Interval (1/min)	Heilungsphase: 10 (t=1:1000 min), 6 (t:1001:2980 min) Wiederbelastung: 30	
Impulsspannung (V)	800	
Pulsweite (µs)	5 (Rechteck-Puls)	Matlab
High-Pass-Softwarefilter (kHz)	4	

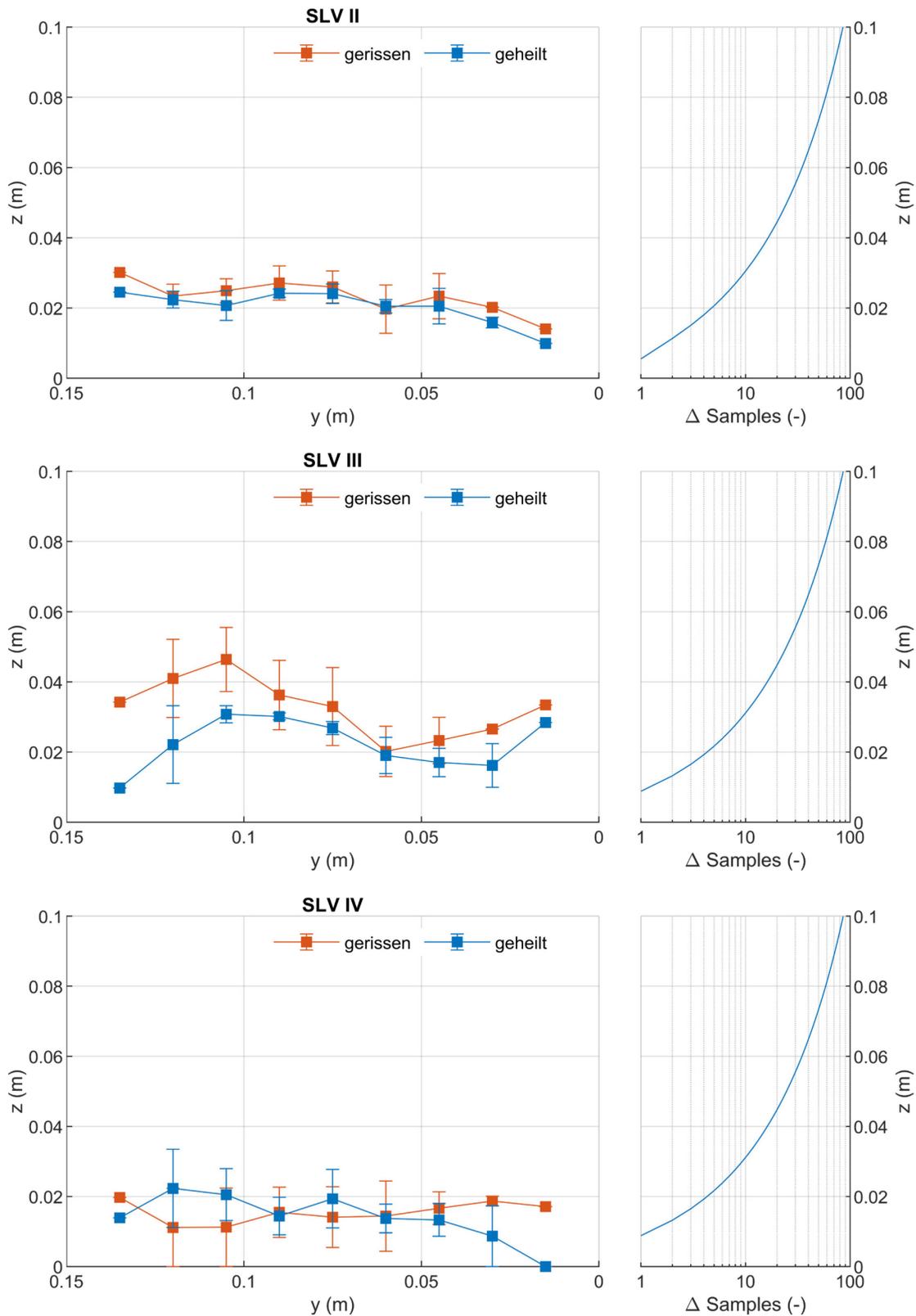


Abbildung 0-13: Risstiefenbestimmung von Testkörper „SLV II-IV“ (tomografischer Ansatz) nach Rissinitierung und nach dreitägiger Heilung.

Tabelle 0-15: Mess- und Systemeinstellungen für SEA innerhalb der „SLV“-Betontestkörperserie.

<b>Anzahl an Sensoren</b>	<b>14</b>
<b>Verstärkung</b>	60 dB
<b>Hochpass/Tiefpass-Filter</b>	10 kHz/1 MHz
<b>Software</b>	Elsys TranAX (ECR Multichannel)
<b>Abtastrate</b>	5 MHz
<b>Pretrigger</b>	500 S
<b>Posttrigger</b>	5 kS
<b>HoldOff</b>	5,5 kS
<b>Spannungsbereich</b>	20 V
<b>Threshold (Slew Rate Trigger)</b>	0,2V/10 S

Tabelle 0-16: Sensorkoordinaten für SEA („initial“) des „REF“-Testkörpers innerhalb der „SLV“-Betontestkörperserie.

Sensor	REF		
	x (m)	y (m)	z (m)
1	0,146	0,000	0,014
2	0,285	0,000	0,078
3	0,152	0,000	0,081
4	0,094	0,015	0,100
5	0,277	0,014	0,100
6	0,126	0,132	0,100
7	0,300	0,133	0,100
8	0,272	0,150	0,083
9	0,107	0,150	0,079
10	0,226	0,150	0,014
11	0,295	0,131	0,000
12	0,118	0,126	0,000
13	0,269	0,018	0,000
14	0,108	0,022	0,000

Tabelle 0-17: Sensorkoordinaten für SEA („wiederbelastet“) innerhalb der „SLV“-Betontestkörperserie.

Sensor	SLV I			SLV II		
	x (m)	y (m)	z (m)	x (m)	y (m)	z (m)
1	0.230	0.000	0.011	0.161	0.000	0.015
2	0.286	0.000	0.080	0.288	0.000	0.017
3	0.124	0.000	0.081	0.270	0.000	0.082
4	0.302	0.020	0.100	0.114	0.021	0.100
5	0.103	0.019	0.100	0.309	0.015	0.100
6	0.116	0.133	0.100	0.147	0.124	0.100
7	0.276	0.137	0.100	0.286	0.125	0.100
8	0.130	0.150	0.078	0.253	0.150	0.083
9	0.290	0.150	0.078	0.115	0.150	0.083
10	0.229	0.150	0.014	0.143	0.150	0.017
11	0.113	0.128	0.000	0.284	0.131	0.000
12	0.101	0.014	0.000	0.095	0.121	0.000
13	0.302	0.018	0.000	0.260	0.025	0.000
14	0.288	0.114	0.000	0.109	0.021	0.000
	SLV III			SLV IV		
1	0.232	0.150	0.014	0.230	0.000	0.011
2	0.111	0.150	0.015	0.286	0.000	0.080
3	0.151	0.150	0.084	0.124	0.000	0.081
4	0.280	0.137	0.100	0.302	0.020	0.100
5	0.113	0.128	0.100	0.103	0.019	0.100
6	0.151	0.016	0.100	0.116	0.133	0.100
7	0.274	0.017	0.100	0.276	0.137	0.100
8	0.099	0.000	0.082	0.130	0.150	0.078
9	0.252	0.000	0.083	0.290	0.150	0.078
10	0.177	0.000	0.016	0.229	0.150	0.014
11	0.100	0.016	0.000	0.113	0.128	0.000
12	0.294	0.016	0.000	0.101	0.014	0.000
13	0.118	0.134	0.000	0.302	0.018	0.000
14	0.278	0.133	0.000	0.288	0.114	0.000

## E. English Summary

To make cement-bound materials more sustainable and durable, researchers and scientists have been developing numerous self-healing procedures. These methods are intended to seal crack-damaged structures or to gain a force-fitted bonding. Within the scope of this thesis, a selection of different healing mechanisms has been applied and evaluated in three differently scaled cementitious test series (mortar prisms, small concrete beams, large concrete beams/plates). This approach focused on the conceptual design of a test set-up to monitor and characterize the entire process from an intact test specimen to the final healing stage. The study comprised the development of novel material and the evaluation of the efficiency on real component structures. Various non-destructive testing methods (vibration analysis, ultrasound in transmission, acoustic emission analysis, impact-based surface wave measurement) were used to determine the material properties or the healing efficiency of bacterial spores, ureolytic mixed cultures, superabsorbent polymers and polyurethanes (PU). In addition to the examination of the self-healing efficiency, the investigation of mortar prisms included also a characterisation of the modified technological concrete properties of the fresh mortar both in hardened state and affected by long-term water exposure. Taking into account the deviations of the controlled crack width initiation and autogenous material variations during cyclic water immersion, no technological analysis or acoustic test method could provide a reliable evaluation for an autonomous crack closure for the mortar test series. A manual injection with PU resulted in an adhesive bond. Mortar prisms with a complete crack backfilling exceeded the maximum load levels of the initial 3-P bending test during reloading. Single non-destructive measurement data did not reflect this limit exceedance. Nevertheless, the self-healing efficiencies (SHE), determined from the resonance frequencies (vibration analysis), correlated with the relative degree of backfilling of the individual mortar prisms.

The application of small concrete beams ( $550 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3 / 400 \times 150 \times 100 \text{ mm}^3$ ) with embedded PU-filled glass capillaries provided a quantitative crack depth determination by means of ToFD<sup>35</sup> methods before and after the healing phase. By the use of the very low viscosity PU, the crack filling started immediately after activation during the 3-P-bending test. Due to this rapid onset, only the in-situ ultrasonic measurement allowed to capture the filling and curing process right after the capsule rupture. Parallel to the bending test, the applied qualitative acoustic emission analysis detected the chronological sequence of the damage development of the initial and healed test specimen. During the initial 3-P bending test, the selection of the acoustic emissions via the energy led to a differentiation between emissions of the concrete matrix and embedded glass capillary fractures. A subsequent localization confirmed the initially quantitative evaluation. However, the release of emissions from the fracture process of the healed test specimen depends very significantly on the load-bearing capacity of the rebond and the brittleness or ductility of the PU. The individual concepts of damage as well as the confined storage conditions of the structural elements (large concrete beams/plates) limited the range of testing procedures and required an adapted measurement and analysis methodology. Within the examination of large concrete beams, single bending cracks with defined crack widths were initiated by a manual 3-P-bending test. As a result, in the initial state, the ToFD results revealed that an increasing crack width

---

<sup>35</sup> Time-of-Flight-Diffraction (ToFD)

is accompanied by an increasing crack depth. Yet, an exact correlation was not obtained, as the calculated crack depths were less than the results from collected drill core samples. The 4-week curing period consisted of a periodic water sprinkling, which produced a steady water stream on the cracked surface. After drying, thin section samples indicated minor calcite precipitation on the crack flanks. Mechanical crack sealing, which resulted from sediment transport, triggered reduced crack depths with the ToFD method. Furthermore, the complex and varying crack formations along the rough and uneven surface led to an inhomogeneous amplitude pattern with very irregular waveforms, which only showed slight changes in the healed state. In contrast, the impact surface wave excitation revealed significantly lower frequencies and higher amplitude. This implied a consistent time delay of the signal wave front across all measuring points after crack initiation. After the end of water exposure, a reverse trend was provoked.

The demonstrated experimental procedures and evaluations confirmed that non-destructive testing methods have the potential to characterize the novel material and to detect test relevant variations. While the applied measurement technique and the limited number of test specimens only offered a reliable quantitative evaluation of PU-based self-healing, the selected analysis parameters provide prerequisites for future research. It must be taken into consideration that the outcome in this thesis only reflects the results of one of countless individual measurement setups. In order to optimize the explorative data analysis, measuring instruments and test procedures have to be adapted more specifically to abounding boundary conditions. Similar to the design optimization of microencapsulations [Savija et al. 2015, Šavija et al. 2016], numerical modelling would be beneficial as a supporting tool for non-destructive testing.