

Rissmonitoring und Bewertungsmodell von unbewehrten Tunnelinnenschalen

RIBET

Deliverable D 3

Riss-Monitoring

(VIF2017)

AutorInnen:

DI Madeleine WINKLER

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner LIENHART

DI Maciej KWAPISZ

DI. Dr. Alois VORWAGNER

DI. Dr. Dominik PRAMMER

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Technische Universität Graz- Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Einleitung | 5 |
| 1 gegenüberstellung und bewertung der Methoden | 7 |
| 1.1 Manuelle Verfahren | 7 |
| 1.2 Elektronische Verfahren | 8 |
| 1.3 Optische Verfahren | 10 |
| 1.4 Laserbasierte Verfahren | 11 |
| 1.5 Faseroptische Verfahren | 12 |
| 1.5.1 Punktuelle und quasiverteilte Messverfahren | 12 |
| 1.5.2 Verteilte Messverfahren | 13 |
| 1.6 Vergleichende Übersicht | 15 |
| 2 KONzeptionierung des messsystems | 17 |
| 2.1 Faserauswahl | 17 |
| 2.2 Klebeversuche | 19 |
| 2.3 Faseroptisches Messinstrument | 20 |
| 3 Kalibrierung des messsystems für Rissmessung | 21 |
| 3.1 Laboraufbauten | 21 |
| 3.2 Durchführung der Versuche | 23 |
| 3.3 Ergebnisse | 24 |
| 4 Testversuche zur risserfassung an einem bauteil | 28 |
| 4.1 Allgemeines | 28 |
| 4.2 Versuchskonzept und Design | 28 |
| 4.2.1 Design der Versuchsdurchführung | 29 |
| 4.2.2 Fertigung der Probekörper | 34 |
| 4.2.3 Konzept der Faserapplikation | 36 |
| 4.3 Applikation der Sensorfasern | 38 |
| 4.4 Versuchsdurchführung | 39 |
| 4.4.1 Ablauf der Belastungstests | 39 |

| | | |
|-------|---------------------------------------|----|
| 4.4.2 | Durchführung der Messungen..... | 41 |
| 4.5 | Ergebnisse | 43 |
| 4.5.1 | Begleitende Materialtests..... | 43 |
| 4.5.2 | Faseroptische Messergebnisse | 43 |
| 4.5.3 | Numerische Nachrechnung..... | 51 |
| 5 | Messmethodik und Datenmanagement..... | 54 |
| 5.1 | Komponenten | 54 |
| 5.2 | Applikation..... | 54 |
| 5.3 | Datenerfassung..... | 55 |
| 5.4 | Datenauswertung | 56 |
| 6 | Zusammenfassung..... | 58 |
| | Literaturverzeichnis..... | 60 |

Version 0.2

Versionshistorie

| Version | Änderung | Bearbeiter |
|---------|-------------|------------|
| 0.1 | Erstentwurf | AIT, IGMS |
| 0.2 | Final | AIT, IGMS |

| Formatvorlage | Schriftart | Schriftgröße |
|--|------------------------------|---------------------|
| Hauptkapitelüberschriften | Arial, fett, Großbuchstaben | 13pt |
| Überschriften | Arial, fett | 13pt |
| Standardtext | Arial, 1,5-zeilig, Blocksatz | 11pt |
| Überschriften von Verzeichnissen | Arial, fett, Großbuchstaben | 13pt |
| Inhaltsverzeichnis Abbildungsverzeichnis Tabellenverzeichnis Literaturverzeichnis | Arial | 12pt |
| Fußnotenzeichen | Arial, hochgestellt | 10pt |
| Fußnotentext | Arial | 10pt |
| Untertitel von Tabellen und Abbildungen | Arial, fett | 10pt |
| Quelle von Tabellen und Abbildungen | Arial | 8pt |
| Seitennummerierung | Arial, zentriert, Seitende | 10pt |

EINLEITUNG

Bei der Überwachung von unbewehrten Tunnelinnenschalen sind zum einen die Entstehung von neuen Rissen und zum anderen die Erfassung der Breite und Tiefe von bereits bestehenden Rissen, sowie deren Änderung im zeitlichen Verlauf, von Bedeutung. Ein weiterer wichtiger Aspekt besteht in der Anordnung der Risse auf der Tunnelinnenschale (Rissbild).

Bisher wurde die Überwachung der Tunnelinnenschale weitestgehend visuell und manuell mittels Rissbreitenlineal oder Risslupe im Rahmen einer Begehung des Tunnels durchgeführt. Dies ist allerdings nur bei bereits bestehenden Rissen möglich und erfordert einen uneingeschränkten Zugang zur Tunnelinnenschale. An der Innenschale angebrachte Brandschutzplatten müssten in diesem Fall demontiert werden, was einen hohen manuellen und zeitlichen Aufwand bedarf. Automatische Messverfahren, wie Dehnmessstreifen, lineare Wegaufnehmer oder Schwingsaitensensoren, bieten zwar die Möglichkeit einer automatisierten Rissweitenerfassung bei bereits bestehenden Rissen, allerdings ist, da diese nur punktuell eingesetzt werden können, die Erfassung eines einheitlichen Rissbildes sowie die Erfassung von neuen Rissen nicht möglich.

Die Lokalisierung von einzelnen Rissen und die Bestimmung von Rissbildern ist nur mittels lückenlosen Messverfahrens möglich. Dazu gehören bildgebende Messverfahren, Laserscanning und verteilte faseroptische Messsysteme (Distributed Fibre Optic Sensing, DFOS). Bildgebende Messverfahren verwenden Ansätze aus der Photogrammetrie, der Bildverarbeitung und des maschinellen Sehens. Bei Tunnelanwendungen sind Beleuchtungsqualität und Luftqualität entscheidend. Eine geringe Lichtstärke und staubige Luft liefern Bilder mit hohem Rauschen, wodurch eine genaue Auswertung schwierig oder unmöglich wird. Weiters kann sich Schmutz an den Rissen ablagern, sodass diese in den Bilddaten größer als tatsächlich erscheinen. Durch Laserscanning kann die Tunneloberfläche auch in Dunkelheit erfasst werden. Laserscanning eignet bei Tunnelanwendungen sehr gut um großräumige Aussagen zu treffen. Für die Detektion von feinen Rissen ist die Divergenz der ausgesandten Laserstrahlen jedoch zu groß. Der Fußabdruck des Lasers ist im Allgemeinen wesentlich größer als einzelne Risse, weshalb diese in der Punktwolke nicht abgebildet werden.

All die genannten Monitoringsysteme sind meist mit einem manuellen Aufwand verbunden, subjektiv und erfordern einen freien Zugang zur Tunnelinnenschale. Ist die Tunnelinnenschale mit Brandschutzplatten verkleidet, ist zudem eine Detektion neuer Risse ausschließlich durch eine Demontage dieser Platten möglich. Daher wurde im Zuge des RIBET-Projektes die Anwendung von DFOS zur Erfassung von Rissen untersucht.

Distributed Fibre Optic Sensing folgend immer mit **DFOS** abgekürzt bietet den Vorteil, dass die hierzu verwendeten Glasfasern hinter den Brandschutzplatten an der Tunnelinnenschale appliziert werden können. Eine grundlegende Unterscheidung ist das verwendete Messprinzip, womit der Auflösungsgrad der Messung definiert wird. Mit einem Brillouin-System, wie es bereits schon in ersten Tests bei Tunnelmessungen angewandt wurde, gelangen örtliche Auflösungen von max. 50 cm, was aber dazu führt, dass zwar Dehnungen gemessen werden, die Risse bei unbewehrten Innenschalen nicht wirklich zufriedenstellend lokalisiert bzw. in weiterer Folge Rissbewegungen aufgezeichnet werden können. Erst durch den Einsatz, und kürzlich gerade für Rissmessung getesteter neuer hochauflösender Rayleigh Fibre Sensoren bzw. Auswertalgorithmen können Risse mittels DFOS zuverlässig erkannt und deren Bewegungen überwacht werden. Dies wurde in Anwendungen von Tübingen erst unlängst nachgewiesen [1]. Eine zuverlässige Bestimmung der Rissbreite und -bewegungen aus den verteilten Dehnungsmessungen ist jedoch noch ausständig. Daher besteht das Ziel dieses Arbeitspaketes in der Entwicklung eines Messsystems für die Applikation an die Oberfläche einer bereits bestehenden Tunnelinnenschale zum Zwecke der Riss- und Dehnungsmessungen. Zur Bestimmung des Zusammenhanges zwischen Dehnungsmesswert und Rissbreite werden Laborversuche mit einer faseroptischen Kalibrieranlage, sowie Belastungstests an Versuchsbalken mit der Betongüte von Tunnelinnenschalenbeton durchgeführt. Schlussendlich soll dieses Arbeitspaket eine Empfehlung über ein geeignetes Rissmonitoringsystem basierend auf DFOS für die in Arbeitspaket 5 vorgesehene Applikation in einem bestehenden Tunnel liefern.

1 GEGENÜBERSTELLUNG UND BEWERTUNG DER METHODEN

Für die Erfassung von Rissen steht eine Vielzahl konventioneller Methoden zur Verfügung, die sich im Wesentlichen in manuelle, optische, elektronische und laserbasierte Methoden unterscheiden lassen. Eine Vielzahl dieser Erfassungsmethoden benötigt eine freie Sicht auf die Tunneloberfläche, die im Falle von Verkleidungen (z.B. Brandschutzplatten) nicht gegeben ist. Daher sind statische und mobile Laserscan- und Bildaufnahmeverfahren nicht geeignet. Kontaktbasierte Verfahren wie z.B. Dehnmessstreifen, lineare Wegaufnehmer und Schwingsaitensensoren ermöglichen zwar eine punktuelle Erfassung von Rissbreitenänderungen, können aber nicht flächendeckend eingesetzt werden. Daher kann mit diesen Messverfahren immer nur ein unvollständiges bzw. nicht eindeutiges Rissbild abgeleitet werden. Als alternatives Verfahren stellten sich im Zuge der Recherchen daher die verteilten faseroptischen Messverfahren heraus. Diese ermöglichen eine lückenlose Erfassung von Dehnungen entlang der Messfaser.

Die unterschiedlichen Messverfahren werden nun im Nachfolgenden im Detail diskutiert und in weiterer Folge gegenübergestellt.

1.1 Manuelle Verfahren

Bei manuellen Verfahren wird der Rissbreite im Zuge einer Begehung an zuvor bestimmten Punkten und in regelmäßigen zeitlichen Abständen mittels eines Rissbreitenlineals gemessen, wie in Abbildung 1 dargestellt.

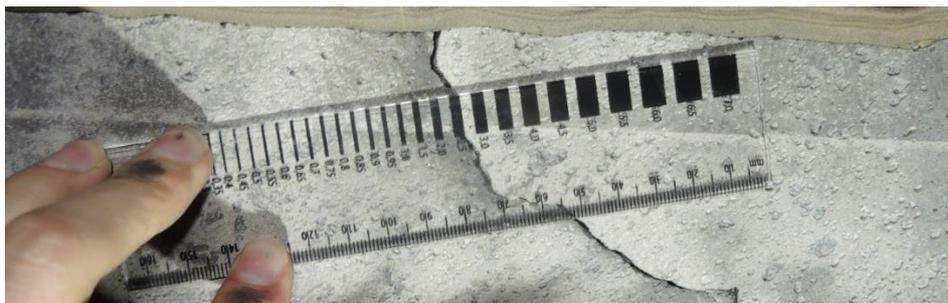


Abbildung 1: Erfassung von Rissbreiten mittels eines Rissbreitenlineals

Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, finden auch Risslupen Verwendung, die einen lokalen Ausschnitt des Risses vergrößern. Die Rissweite wird schließlich durch den Abgleich mit einer Skala bestimmt (siehe Abbildung 2) [6].

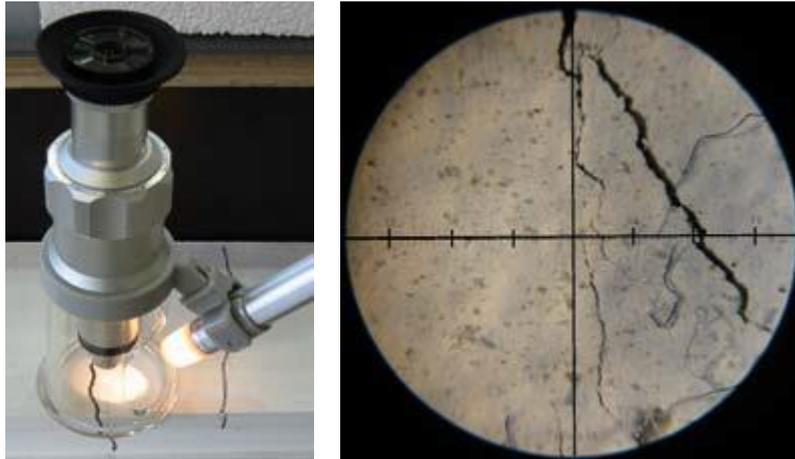


Abbildung 2: Erfassung der Rissweite mittels einer Risslupe (links) durch Vergrößerung eines Rissausschnittes und Vergleich mit einer Skala (rechts) (aus [6])

Da die Rissbreite über den Verlauf des Risses entlang der Tunnelinnenschale jedoch variieren kann und auch Versinterungen oder Abplatzungen an der Innenschale die Rissbreite verfälschen können, ist eine Kartierung eines zuverlässigen Rissbildes nicht möglich. Zudem ist diese Art der Erfassung subjektiv sowie zeit- und kostenintensiv und eine kontinuierliche Erfassung der Rissbreiten nicht möglich.

1.2 Elektronische Verfahren

Im Vergleich zu manuellen Messverfahren handelt es sich bei elektronischen Verfahren ebenfalls um punktuelle Erfassungsmethoden, jedoch können keine absoluten Rissbreiten, sondern lediglich Rissbreitenänderungen bestimmt werden. Die Messungen können kontinuierlich mit einer vorgegebenen Messfrequenz erfolgen. Je nach Funktionsweise können verschiedene Arten von elektronischen Verfahren unterschieden werden.

Wegaufnehmer, wie beispielsweise in Abbildung 3, bestehen im Wesentlichen aus zwei Widerlagern, die in einem bekannten Abstand zueinander auf beiden Seiten des Risses fix mit dem Untergrund verbunden werden. Zwischen diesen beiden Punkten wird schließlich die Längenänderung gemessen [6].



Abbildung 3: Darstellung eines Wegaufnehmers (aus [6])

Die Erfassung der Rissbreite mittels Dehnmessstreifen (DMS), wie in Abbildung 4, erfolgt durch die Erfassung des elektrischen Widerstandes, welcher sich proportional zur Dehnung verhält. Prinzipiell ist der DMS nur für die Erfassung von geringen Dehnungsänderungen geeignet. Bei größeren Dehnungsänderungen würde die Gefahr des Durchreißens des DMS bestehen [6].



Abbildung 4: Darstellung eines Dehnmessstreifen

Mittels eines Schwingsaitensensors werden Änderungen der Schwingfrequenz einer gespannten Saite gemessen. Ändert sich die Spannung der Saite aufgrund einer Längenänderung, ändert sich auch die Schwingfrequenz im Vergleich zum Ursprungszustand. Damit kann durch die Änderung der Schwingfrequenz direkt auf die aufgetretene Längenänderung rückgeschlossen werden. Schwingsaitensensoren finden beispielsweise in der Brückenüberwachung oder Überwachung von Tunneltübungen Anwendung (siehe Abbildung 5) [6].

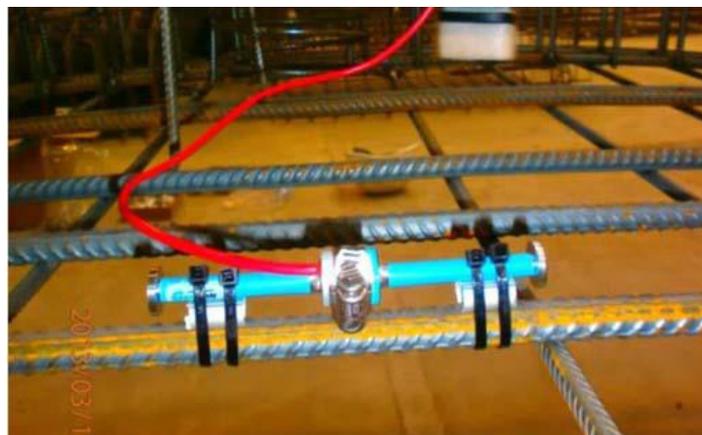


Abbildung 5: Implementierung von Schwingsaitensensoren in Tunneltübungen (aus[6], S. 37)

Die Systeme können zwar kontinuierlich Rissweitenänderungen erfassen, jedoch müssen Risse bereits ersichtlich sein, um diese Sensoren sinnvoll platzieren zu können. Demzufolge ist eine automatische Erfassung von neuen Rissen nicht möglich.

1.3 Optische Verfahren

Optische Verfahren basieren üblicherweise auf den Prinzipien der Nahbereichsphotogrammetrie, welche sich mit der Extraktion von zuverlässigen zwei- und dreidimensionalen Informationen aus Bilddaten beschäftigt [2]. Dabei werden von dem zu beobachteten Objekt mit mehreren Kameras aus mehreren Richtungen Fotos aufgenommen. Die Bestimmung von 3D-Koordinaten von Objektpunkten erfolgt über Bestimmung der 3D-Koordinaten aus Bildkoordinaten homologer Punkte, die in mehreren Bildern ersichtlich sind. Solche homologen Punkte sind in den meisten Fällen kreisförmige Zielmarken, die am Objekt aufgebracht werden. Die Bestimmung der Rissbreiten und Änderung der Rissbreiten erfolgt durch die Differenzbildung zwischen den Bildern zweier Messepochen. Bei der Risserfassung mittels Kameras können Risse mit einer Breite im Zehntelpixelbereich detektiert werden. Die Messgenauigkeit eines solchen Systems ist stark von der Größe des aufgenommenen Bereiches, sowie von der Lichtqualität und der Qualität der Kamera abhängig. Bei optimalen Verhältnissen können Rissweiten mit einer Messgenauigkeit von 1 μm bestimmt werden.

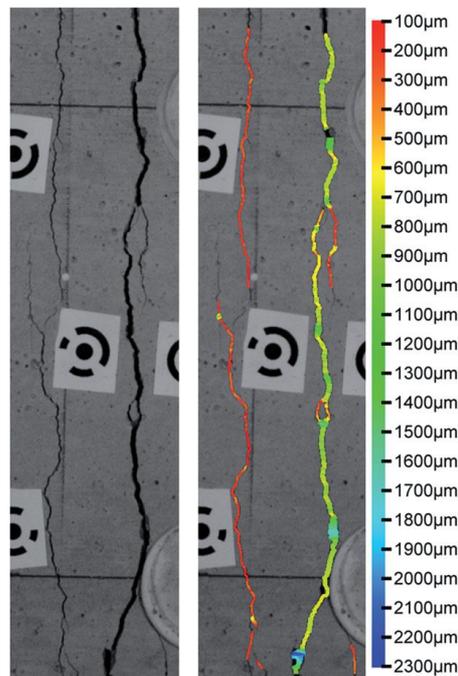


Abbildung 6: Rissbreitenmessung durch Nahbereichsphotogrammetrie (aus [2])

Die optischen Verfahren bieten vor allem den Vorteil, dass flächenhafte Informationen und damit ein einheitliches Rissbild erfasst werden können. Zudem können auch neu entstandene Risse detektiert werden. Hinsichtlich der Anwendbarkeit im Tunnel ergeben sich allerdings einige limitierende Faktoren. Zum einen benötigen diese Verfahren freie Sicht auf die Tunnelinnenschale, welche durch Brandschutzplatten nicht mehr gegeben ist und zum anderen herrschen meist schlechte Lichtverhältnisse, welche eine Verschlechterung der Messgenauigkeit mit sich bringt.

1.4 Laserbasierte Verfahren

Eine weitere Möglichkeit zur flächenhaften Erfassung der Tunnelinnenschale stellt das Laserscanning dar. Beim Laserscanning wird die Oberfläche durch einen rotierenden Laser abgetastet. Der Scan kann dabei entweder statisch von mehreren Standpunkten aus erfolgen oder durch eine Befahrung, wobei in diesem Fall der Laser auf einem Fahrzeug montiert wird. Moderne Laserscanner sind in der Lage mehr als 1 Million Punkte pro Sekunde aufzunehmen, wodurch eine große Menge an Daten entsteht. Wird die Tunnelinnenschale in zwei Epochen aufgenommen, so können durch Differenzbildung die Deformationen der Tunnelinnenschale zwischen den beiden Epochen bestimmt werden. Solche Deformationsanalysen basierend auf Laserscanning werden bereits im Tunnelbau durch die Amberg Technologies AG eingesetzt ([1]), wie in nachfolgender Abbildung 7 dargestellt.

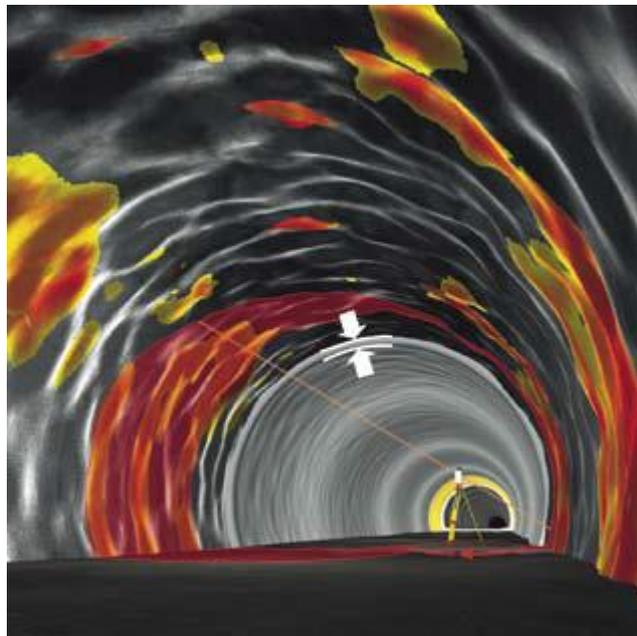


Abbildung 7: Deformationsanalyse durch den Einsatz von Laserscanning (aus [1])

Im Vergleich zu kamerabasierten Verfahren haben die Lichtverhältnisse keinen Einfluss auf das Ergebnis, jedoch spielt der Einfluss der Refraktion eine wichtige Rolle. Durch die Refraktion ändert sich zum einen die Laufzeit des Lasers, wodurch die Distanzmessung verfälscht wird und zum anderen kann es zu einer Beugung des Laserstrahls kommen, wodurch nicht gewünschte Objektteile abgetastet werden. Zudem ist der Fußabdruck des Lasers im Allgemeinen wesentlich größer als einzelne Risse, weshalb diese in der Punktwolke nicht abgebildet werden. Lediglich Risse, die beispielsweise Versinterungen aufweisen, treten aus dem Scan hervor. Eine Bestimmung der Rissweite ist jedoch nicht möglich.

1.5 Faseroptische Verfahren

Im Vergleich zu den zuvor beschriebenen konventionellen Sensoren bieten faseroptische Sensoren den Vorteil, dass diese keine Sichtverbindung zur Tunnelinnenschale benötigen, sondern hinter den Verkleidungselementen installiert werden können und eine kontinuierliche Erfassung von Rissbreitenänderungen erfolgen kann.

Das Grundprinzip faseroptischer Verfahren besteht darin, dass Licht in den Kern einer Glasfaser eingekoppelt wird und dort gestreut wird, wobei ein geringer Teil des gestreuten Lichtes zur Messeinheit rückgestreut und von dieser erfasst wird. Beeinflussen mechanische Einflüsse die Glasfaser von außen, so ändert sich auch das Spektrum des rückgestreuten Lichtes. Aus der Änderung des rückgestreuten Spektrums kann nach einer Kalibrierung des Messsystems schließlich auf die Dehnungsänderungen rückgeschlossen werden. Aufgrund der Laufzeit kann die Position entlang der Faser berechnet werden.

Bei faseroptischen Messverfahren unterscheidet man im Wesentlichen punktweise, quasiverteilte und verteilte Messverfahren, die nachfolgend detaillierter beschrieben werden.

1.5.1 Punktuelle und quasiverteilte Messverfahren

Bei punktuellen und quasiverteilten faseroptischen Sensoren weist die Glasfaser Manipulationen in Form von Spiegeln oder Faser Bragg-Gittern (wellenlängenabhängigen Spiegel) auf, die eine Streuung des eingekoppelten Lichtsignals bewirken. Abhängig davon ob nur eine Manipulation am Ende oder mehrere Manipulationen aufeinanderfolgend in die Glasfaser integriert sind, spricht man von punktuellen oder quasiverteilten Sensoren (siehe Abbildung 8).



Abbildung 8: Prinzipskizze von punktuellen (links) und quasiverteilten faseroptischen Sensoren (rechts)

Diese Manipulationen werden bereits im Zuge des Herstellungsprozesses in die Glasfaser integriert. Die nicht manipulierten Bereiche der Glasfaser dienen lediglich als Leiter für das eingekoppelte bzw. rückgestreute Licht. Treten daher Risse zwischen den sensitiven Bereichen auf, können diese nicht erfasst werden, wodurch eine zuverlässige Erfassung eines Rissbildes nicht gewährleistet werden kann.

1.5.2 Verteilte Messverfahren

Verteilte faseroptische Sensoren nutzen im Vergleich zu Punktsensoren und quasi-verteilten Sensoren die natürliche Streuung des Lichtes an Partikeln in der Glasfaser. Sie besitzen daher die Eigenschaft, dass jede Position der Faser auf äußere Einflüsse sensitiv ist. Vereinfacht ausgedrückt, erhält man durch verteilte faseroptische Messungen eine lückenlose Reihe von Punktmessungen entlang der Faser mit einer entsprechenden räumlichen Auflösung. Die Faser kann demzufolge über ihre gesamte Länge als sensitives Element angesehen werden und durch eine einzige Messfaser können bis zu mehrere 10000 Messstellen realisiert werden (siehe Abbildung 9).

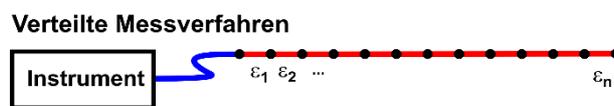


Abbildung 9: Prinzipskizze eines verteilten faseroptischen Dehnungsmesssystems

Durch die lückenlose Messung können bei geeignet hoher Ortsauflösung lokale Defekte wie Risse detektiert werden. Somit gibt es keine „blind spots“ und auch neu auftretende Risse können bei ausreichend hoher Auflösung des Messsystems erkannt werden. Theoretisch bedeutet ein Riss, dass eine Länge $L = 0$ sich plötzlich auf eine Länge $\Delta L = \text{Rissbreite}$ vergrößert (Abbildung 10 links und Mitte). Da Dehnung ϵ als $\Delta L/L$ definiert ist, bedeutet dies eine unendliche hohe Dehnung an der Position des Risses. In der Realität besitzt aber jedes Messkabel einen mehrschichtigen Aufbau, wodurch sich der Riss über eine bestimmte Faserlänge verteilt. Des Weiteren hat jedes faseroptische Messsystem eine bestimmte örtliche Auflösung. Dies bedeutet, dass der Messwert an einer bestimmten Stelle immer dem Mittelwert der Dehnung über die Länge der örtlichen Auflösung entspricht.

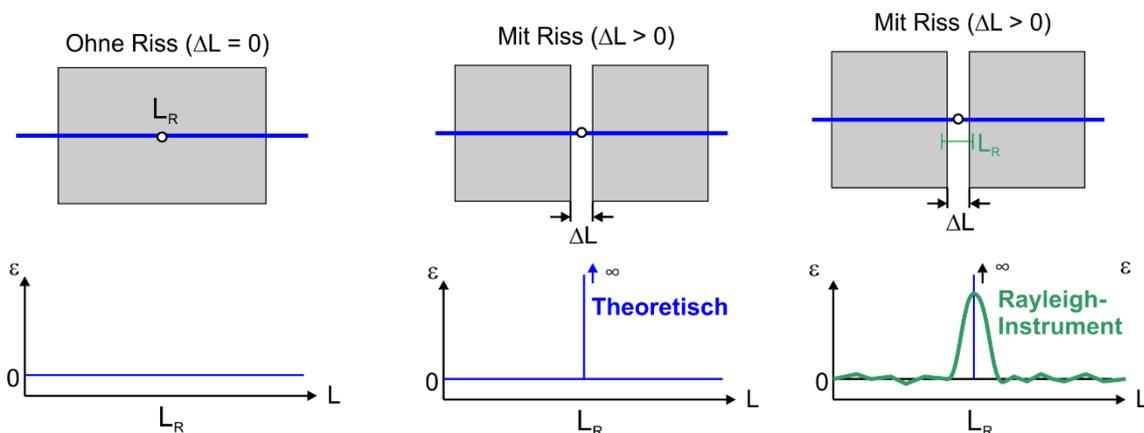


Abbildung 10: Dehnungsverlauf bei Rissbildung: Umgerissener Balken (links) Gerissener Balken und theoretisches Dehnungsprofil (Mitte), Gerissener Balken und Dehnungsprofile erfasst mit Rayleigh Instrumenten (rechts)

Bei hochauflösenden Messsystemen basierend auf der Rayleigh-Rückstreuung ist diese Auflösung (L_R) 1 cm oder besser. Bei solch hohen Auflösungen zeigen sich Risse als eindeutig identifizierbare Dehnungsspitzen. Bei diesen Messsystemen ist die Reichweite üblicherweise mit einigen 10er Metern beschränkt. Mit der Spezialsoftware des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS) der TU Graz können jedoch automatisch Messungen durch gleitende Fenster über eine Gesamtlänge von 2 km durchgeführt werden. Mit Instrumenten basierend auf der Brillouin-Rückstreuung sind zwar Reichweiten von mehreren 10er Kilometern möglich, allerdings besitzen diese Systeme lediglich eine räumliche Auflösung von 0.5 m und daher für die Anwendung der Rissdetektion nicht geeignet. Durch die geringe räumliche Auflösung verschmieren sich Risse und treten nicht aus dem Rauschen heraus bzw. liefern mehrere Risse nur ein kombiniertes Signal.

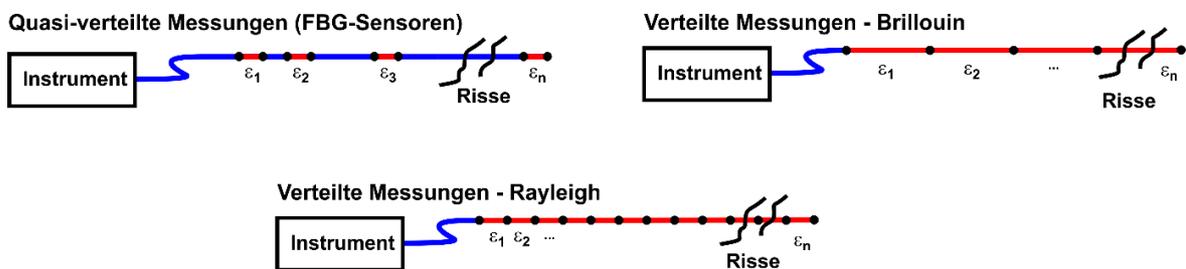


Abbildung 11: Rissfassung mit faseroptischen Messverfahren: Quasiverteilte Messverfahren (links oben), Brillouin Messverfahren (rechts oben), Rayleigh Messverfahren (unten)

Neben der räumlichen Auflösung weist das Verfahren basierend auf der Rayleigh-Rückstreuung einen weiteren Vorteil auf. Während für Messungen basierend auf der Brillouin-Rückstreuung üblicherweise eine in Form einer Schleife applizierte Sensorfaser erforderlich ist, sind Messungen basierend auf der Rayleigh-Rückstreuung auch einseitig möglich (siehe Abbildung 12). Dies bietet den Vorteil, dass bei einer beidseitigen Messung im Falle eines Faserrisses die Dehnungen bis zum Riss erfasst werden können.

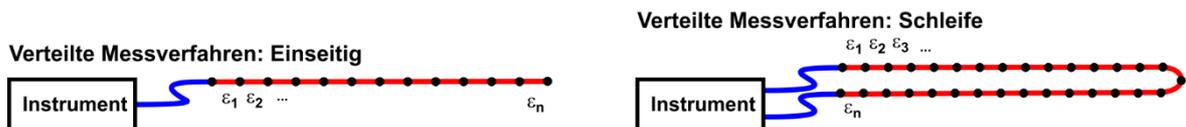


Abbildung 12: Prinzipskizze eines einseitigen Messsystems (links) und zweiseitigen Messsystems (rechts)

IGMS hat ein solches Messverfahren kürzlich erfolgreich zur Lokalisierung von Rissen in bewehrten Betontübbingungen eingesetzt. Abbildung 3 zeigt, dass sich Risse bei einem bewehrten Belastungstest durch lokale Dehnungsspitzen erkennbar sind [1].

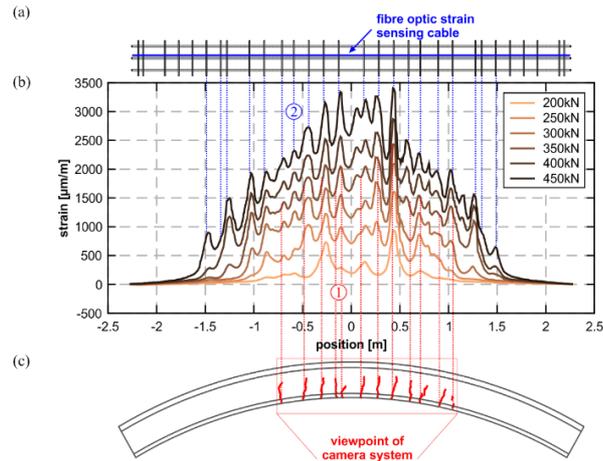


Abbildung 13 Rissdetektion im Inneren von Tübbing mit verteilten faseroptischen Messungen basierend auf der Rayleigh-Rückstreuung (aus: [1])

1.6 Vergleichende Übersicht

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die unterschiedlichen Sensortypen und ihre Eignung für die zuverlässige Erfassung von Rissen an Tunnelinnenschalen gegenübergestellt.

Tabelle 1: Vergleichende Übersicht der unterschiedlichen Messverfahren

| | Manuelle Verfahren | Elektronische Verfahren | Optische Verfahren | Laserbasierte Verfahren | Punktuelle & quasiverteilte Verfahren | Verteilte Verfahren |
|-------------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| Ableitung eines Rissbildes | Red | Red | Green | Green | Red | Green |
| Erfassung von Rissbreitenänderungen | Green | Green | Green | Red | Green | Green |
| Automatische Rissdetektion | Red | Red | Green | Green | Red | Green |
| Keine Sichtverbindung notwendig | Red | Green | Red | Red | Green | Green |
| Kontinuierliche Messung | Red | Green | Red | Red | Green | Green |

Die Gegenüberstellung zeigt dabei, dass manuelle und elektronische Verfahren nicht geeignet sind, da diese nur punktuelle Messungen liefern und eine automatische Rissdetektion sowie die Kartierung eines Rissbildes nicht möglich ist. Bei der manuellen Ablesung ist zudem auch der direkte Zugang zur Tunnelinnenschale notwendig und die Erfassung der Rissweiten ist nur in regelmäßigen zeitlichen Abständen möglich. Kamera- und laserbasierte Messverfahren ermöglichen zwar eine zuverlässige Kartierung des Rissbildes, jedoch ist auch hier eine freie Sichtverbindung zur Tunnelinnenschale notwendig.

Punktuelle und quasiverteile Sensoren bieten zwar den Vorteil, dass diese unter einer vorhandenen Verkleidung appliziert werden können, allerdings nur punktuell Risse erfassen können. Eine automatische Rissdetektion sowie eine Erfassung des Rissbildes ist nur eingeschränkt möglich. Mittels der verteilten faseroptischen Messverfahren dagegen können sowohl neue Risse detektiert werden, als auch bei entsprechendem Applikationslayout ein Rissbild erfasst werden. Zudem können die Sensorfasern hinter den Brandschutzplatten appliziert werden und eine kontinuierliche Messung durchgeführt werden. Dahingehend hat sich das verteilte faseroptische Messverfahren basierend auf der Rayleigh-Rückstreuung als geeignet herausgestellt.

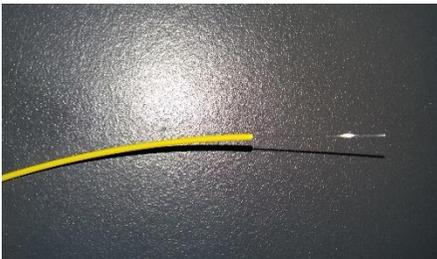
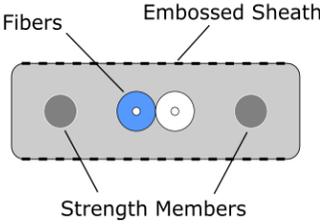
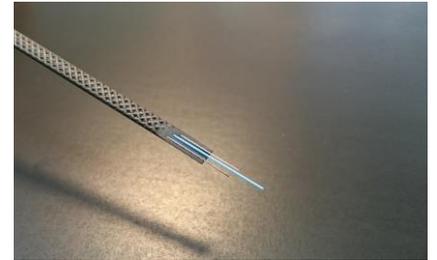
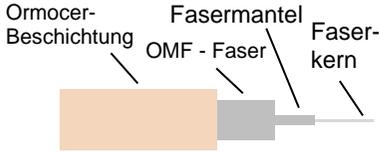
2 KONZEPTIONIERUNG DES MESSSYSTEMS

Neben dem eigentlichen Messinstrument sind das Sensorkabel und die Verbindungsart von entscheidener Bedeutung. Bei der Übertragung der Rissveränderung auf den Glasfaserkern dürfen weder großer Schlupf noch Kriechen auftreten. Dahingehend wurde eine umfassende Recherche für mögliche Sensorfasern und Klebern durchgeführt.

2.1 Faserauswahl

Für die Sensorfaser gilt in erster Linie, dass diese für die Applikation auf einer Oberfläche geeignet sein muss. Dies bedeutet, dass diese für die Applikation auf der Oberfläche ausreichend geschützt ist, jedoch trotzdem hoch sensitiv ist, sodass eine Übertragung der auftretenden Dehnungen auf den Kern der Glasfaser gewährleistet ist. Aufgrund der oben genannten Voraussetzungen stellten sich vier Sensorfasern aus der Recherche als für die Oberflächenapplikation geeignet heraus. Die ausgewählten Sensorfasern sind mit ihren Eigenschaften und eines Schemas des Faseraufbaus in der nachfolgenden Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: kurze Beschreibung und Systemabbildung der ausgewählten Fasertypen

| | | |
|--|---|---|
| <p>Typ TB (Ø 0.9 mm) [7]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schutz der Glasfaser durch Kunststoffschicht • Flexible Führung entlang der Bewehrung • Kosten: < 1 €/m (Sensorfaser, exkl. Konfektionierung) |  |  |
| <p>Typ FiMT (Ø 0.9 mm)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schutz der Glasfaser durch Stahlummantelung • Besserer Schutz der Integrität, jedoch Flexibilität geringer • Kosten: 10 €/m (Sensorfaser, exkl. Konfektionierung) |  |  |
| <p>Typ Neubrex (4.3 mm x 1.7 mm) [5]</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 Sensorfasern • Schutz der Glasfaser durch strukturierte Kunststoffummantelung und 2 Stahldrähte • Kosten: < 5 €/m (Sensorfaser, exkl. Konfektionierung) |  |  |
| <p>Typ HBM (Ø 0.7 mm) [4]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schutz der Glasfaser durch ORMOCER-Beschichtung • Kosten: < 30 €/m (Sensorfaser, exkl. Konfektionierung) |  |  |

2.2 Klebeversuche

Hinsichtlich des Klebers ist vor allem wichtig, dass dieser für eine Applikation über Kopf geeignet ist und eine schnelle Aushärtezeit sowie eine hohe Viskosität aufweist. Im Zuge des Projektes wurden mögliche Kleber verschiedener Hersteller im Labor auf die oben genannten Aspekte getestet (siehe Abbildung 14). Bei den getesteten Klebern handelte es sich um Ankerkleber, Montagekleber, Klebemörtel und Sprühkleber.

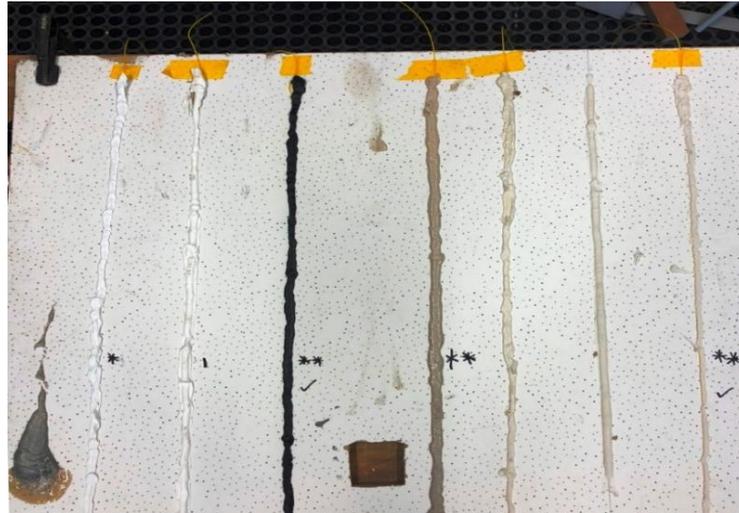


Abbildung 14: Klebeversuche der unterschiedlichen Kleber

Aus den Laborversuchen stellten sich sieben Kleber für Applikation auf den Versuchskörpern als geeignet heraus, welche schließlich an diesen unter Belastung getestet wurden (siehe Kapitel 4). Bei den sieben Klebern handelt es sich um: **Ankerkleber, Multifunktionsmörtel, Monotop, AnchorFix, Montagekleber, Hilti Hit und Hilti Hit HY.**

Die im Rahmen der Voranalyse ausgewählten vier Sensorfasern und sieben Kleber wurden schließlich für die Applikation auf den Versuchskörpern verwendet.

2.3 Faseroptisches Messinstrument

Die verteilten faseroptischen Messungen wurden mit einem Optical Backscatter Reflector-
meter (OBR) des Herstellers Luna Innovations Inc. (im Nachfolgenden als Luna OBR be-
zeichnet) durchgeführt, mit welchem Dehnungen mit einer Auflösung von 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ und Tem-
peraturänderungen mit einer Auflösung von 0.1 K erfasst werden können [1]. Bis zu einer
maximalen Messdistanz von 70 m ist außerdem eine Ortsauflösung von ≤ 10 mm möglich.
Das Messprinzip dieses OBR beruht auf der Optical Frequency Domain Reflectometry
(OFDR). Dabei wird die Rayleigh-Rückstreuung im Frequenzspektrum erfasst und jedes
einzelne Segment Δz nach einer Fourier-Transformation im Ortsbereich betrachtet. Details
können [5] und [9] entnommen werden. Da es sich bei diesem Messsystem um ein relatives
System handelt, ist unmittelbar nach der Applikation der Messfasern eine Messung des
Ausgangsstands erforderlich. Zu dieser Nullmessung werden in weiterer Folge alle folgen-
den Messungen referenziert.



Abbildung 15: OBR des Herstellers Luna Innovations Inc. (aus [1])

3 KALIBRIERUNG DES MESSSYSTEMS FÜR RISSMESSUNG

Bei jeder der vorab basierend auf ihren Eigenschaften ausgewählten Sensorfasern ist aufgrund ihres Aufbaus die Übertragung der Dehnung auf den Glasfaserkern unterschiedlich. Um daher den Zusammenhang zwischen Dehnungsmesswert und Rissbreite bestimmen zu können, wurden die Sensorfasern auf der in ihrer Art einzigartigen faseroptischen Kalibrieranlage des IGMS einer Kalibrierung unterzogen. Simuliert werden dabei eine lineare Risszunahme und ein „Atmen“ eines Risses, durch eine zyklische Zu- und Abnahme der Breite des Risses. Die tatsächliche Breite wird über ein interferometrisches Messsystem erfasst. Durch die zyklische Be- und Entlastung kann zum einen die Reproduzierbarkeit beurteilt und zum anderen auch ein mögliches Hystereseverhalten der Sensorfaser durch eine beschleunigte Alterungssimulation bestimmt werden. Des Weiteren wird auch die Dehngrenze von unterschiedlichen Sensorfasern bestimmt. Die Untersuchungen im Messlabor ermöglichen Detailuntersuchungen ohne Einbettung des sensitiven Elements in Beton. Basierend auf den Ergebnissen werden schließlich potentielle Sensorkabel und Sensorbänder für eine Applikation für Versuchsbalken ausgewählt.

3.1 Laboraufbauten

Alle folgenden Untersuchungen wurden auf der Kalibrieranlage, die speziell für die Untersuchung und Kalibrierung faseroptischer Sensoren vom IGMS entwickelt wurde [8], durchgeführt. Die Hauptkomponenten des Systems bilden ein Verschiebeapparat, der eine absolute Längenänderung des untersuchten Sensors von bis zu 300 mm ermöglicht, sowie ein Laserinterferometer, das zur präzisen Referenzmessung eingesetzt wird. Auftretende Beeinflussungen der Referenzmessung durch Neigungen der Interferometer- bzw. Zugeinheit werden durch Neigungssensoren kompensiert. Zusätzlich erfolgt eine Erfassung der resultierenden Zugkräfte mittels einer Kraftmessdose in der Zugeinheit. Mit Hilfe der Einrichtung können neben vorgefertigten Sensoren (z.B. FBG oder SOFO Punktsensoren) sowohl faseroptische Sensorkabel für verteilte Dehnungsmessungen als auch blanke Glasfasern für spezielle Anwendungen untersucht und kalibriert werden. Einzigartig ist außerdem, dass eine Überprüfung im klimatisierten Messlabor mit Sensorlängen von bis zu 30 m erfolgen kann. Weiterführende Informationen können auch [10] entnommen werden.

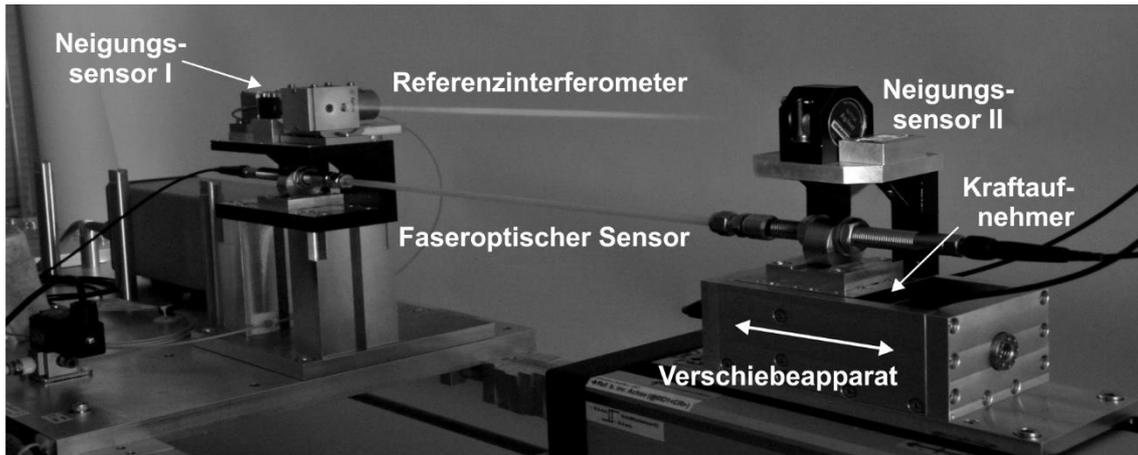


Abbildung 16: Kalibriereinrichtung für faseroptische Dehnungssensoren im IGMS-Labor (aus [4])

Die im Zuge des RIBET-Projektes durchgeführten Laboruntersuchungen lassen sich in zwei Setups aufteilen. Im Nachfolgenden wird dabei die Simulation der Erstrissbildung als Laborsetup S1 und die Simulation der Rissatmung als Laborsetup S2 bezeichnet.

Im Zuge der Simulation der Erstrissbildung (Laborsetup S1) wurden die Fasern der Typen TB, Neubrex und HBM entlang von zwei Trägerplattformen mittels eines Klebemörtels in vorgefertigte Nuten eingeklebt (Abbildung 17, links). Die verklebten Fasern wurden mit samt den Trägerplattformen in die Kalibrieranlage des IGMS eingespannt und einer Reihe von Be- und Entlastungszyklen unterzogen (Abbildung 17, rechts).

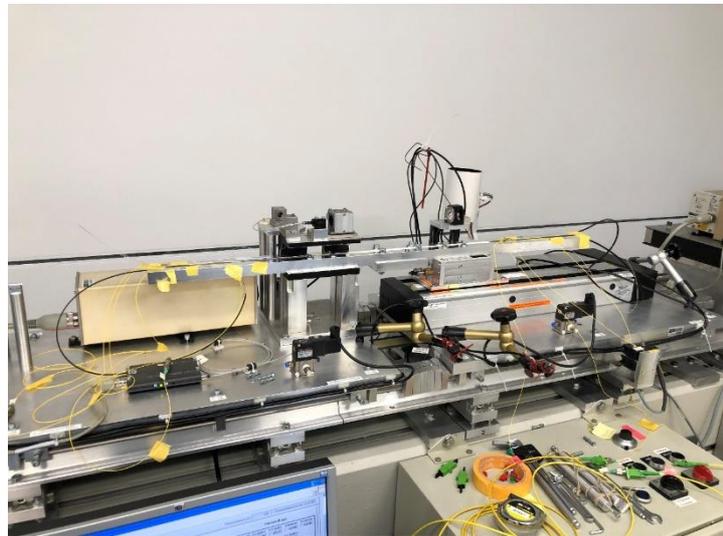


Abbildung 17: Laborsetup S1: Verklebung der Fasern mit der Trägerplattform (links) und in die Kalibrieranlage eingespannte Trägerplattform (rechts)

Zur Simulation der Rissatmung (Laborsetup S2) wurde zunächst eine blanke Glasfaser ohne jeglichen Schutz herangezogen, um möglichst eine, aufgrund der Schutzhülle, unbeeinflusste Erfassung der Rissatmung zu erhalten. Dazu wurde die blanke Faser, wie in Abbildung 18 dargestellt, entlang einer vordefinierten Faserstrecke verklebt. Die Vorrichtung besteht dabei aus drei Trägerplatten, die so konfiguriert sind, dass die beiden äußeren durch den Verschiebeapparat bewegt werden können und die mittlere Platte fix ist. Dadurch können zwei Risse simuliert werden. Insgesamt ergaben sich sechs Messlinien, die die beiden Risse mehrmals kreuzen.



Abbildung 18: Laborsetup S2: Verklebung der blanken Glasfaser in einer vordefinierten Faserstrecke zur Untersuchung der Rissatmung

3.2 Durchführung der Versuche

In einem ersten Schritt sollte im Laborsetup S1 durch das Bewegen des Verschiebeapparates eine Zugbelastung ausgeübt werden bis es zur Entstehung eines Erstrisses kommt. Die Simulation der Erstrissbildung war allerdings nicht möglich, da der Klebstoff nicht abrupt an einer Übergangsstelle, sondern mit zunehmender Belastung über einen größeren Bereich aufgerissen ist. Im weiteren Versuch wurde die Rissbreite um 0.1 mm bis zu einer maximalen Rissbreite von 0.8 mm erhöht. Die Entlastungsstufen erfolgten in 0.2 mm Schritten bis 0.0 mm. Der entstandene Riss ist in Abbildung 19 ersichtlich.



Abbildung 19: Simulation des Erstrisses (Laborsetup S1)

Die Rissatmung wurde im Laborsetup S2 in insgesamt drei Be- und Entlastungszyklen simuliert. Die Be- und Entlastung wurde dabei durch Auseinanderfahren der linken und rechten Trägerplattform laut nachfolgendem Schema aufgebracht, wobei die Schritte 1. bis 4. die Belastung und 5. Bis 7. die Entlastung darstellen:

1. Links = 0.00mm, Rechts = 0.00mm
2. Links = 0.05mm, Rechts = 0.05mm
3. Links = 0.10mm, Rechts = 0.10mm
4. Links = 0.15mm, Rechts = 0.15mm
5. Links = 0.10mm, Rechts = 0.10mm
6. Links = 0.05mm, Rechts = 0.05mm
7. Links = 0.00mm, Rechts = 0.00mm

Die Messungen wurden mit dem bereits in Kapitel 2 beschriebenen Luna OBR jeweils kontinuierlich während des gesamten Versuches durchgeführt.

3.3 Ergebnisse

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse der Kalibrierung zur Erstrissbildung (Laborsetup 1) und Rissatmung (Laborsetup 2) erläutert.

Abbildung 20 zeigt die Strainprofile des Fasertyps Neubrex während der Belastung und Entlastung nach der Erstrissentstehung (Laborsetup S1). Aufgrund der verhältnismäßig dicken Schutzschicht zeigt dieser Fasertyp eine starke Verschmierung des Risses über einen großen Bereich und scheint daher für die Risserfassung nicht geeignet zu sein.

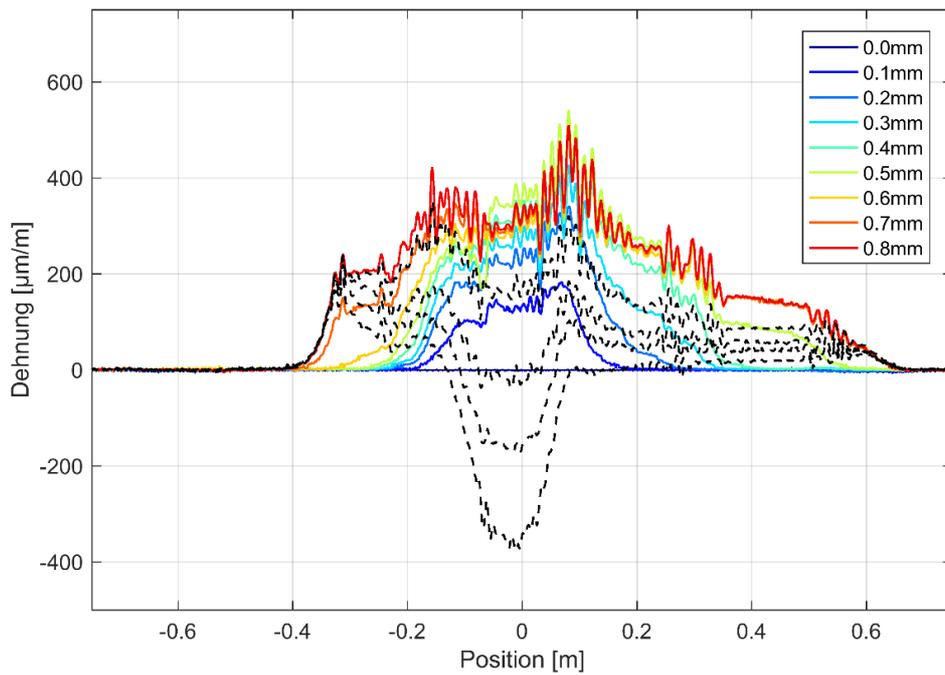


Abbildung 20: Darstellung der Strainprofile des Fasertyps Neubrex während der Simulation des Erstrisses (Laborsetup S1)

Die Strainprofile des Fasertyps HBM während des Be- und Entlastungszyklus in Abbildung 21 zeigen extreme lokale Störungen an der Rissstelle. Dies lässt darauf schließen, dass dieser Fasertyp zu sensitiv und die Schutzschicht zu steif ist, wodurch die Dehnung nur lokal auf die Sensorfaser übergeht.

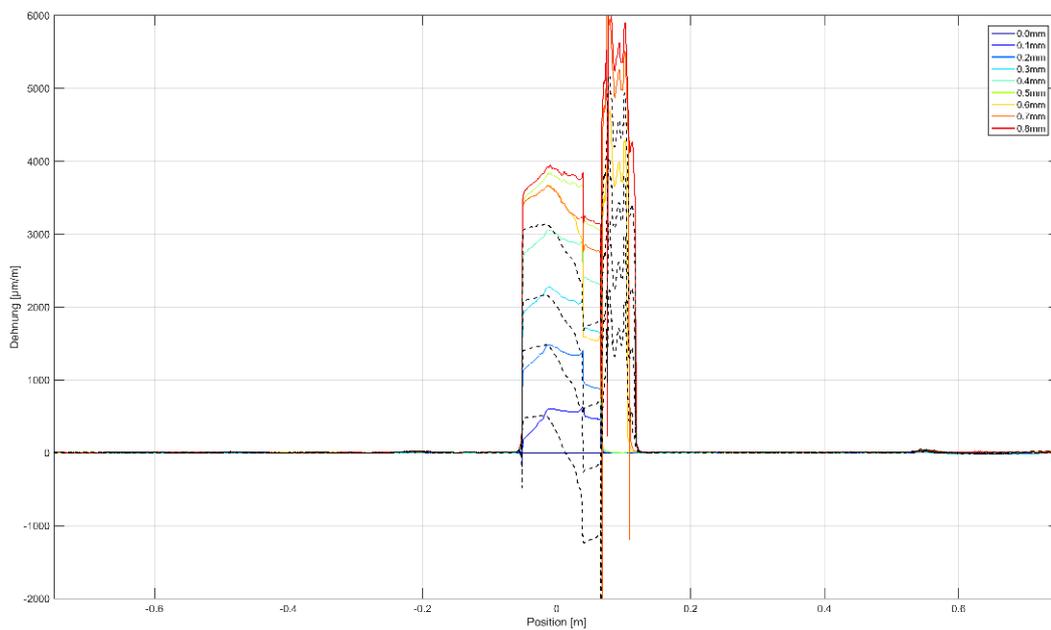


Abbildung 21: Darstellung der Strainprofile des Fasertyps HBM während der Simulation des Erstrisses (Laborsetup S1)

Im Rahmen dieses ersten Kalibrierungsversuches erwies sich der nachfolgend dargestellte Fasertyp TB als am geeignetsten. Wie in Abbildung 22 ersichtlich, zeigen die Strainprofile eine über einen größeren Bereich symmetrisch verteilte Kurve an der Rissstelle. Bei der Entlastung ist eine Stauchung der Faser erkennbar. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Faser durch die Entlastung leicht in den geöffneten Riss hineingedrückt wird. Ein Bruch der Faser ist jedoch nicht zu befürchten.

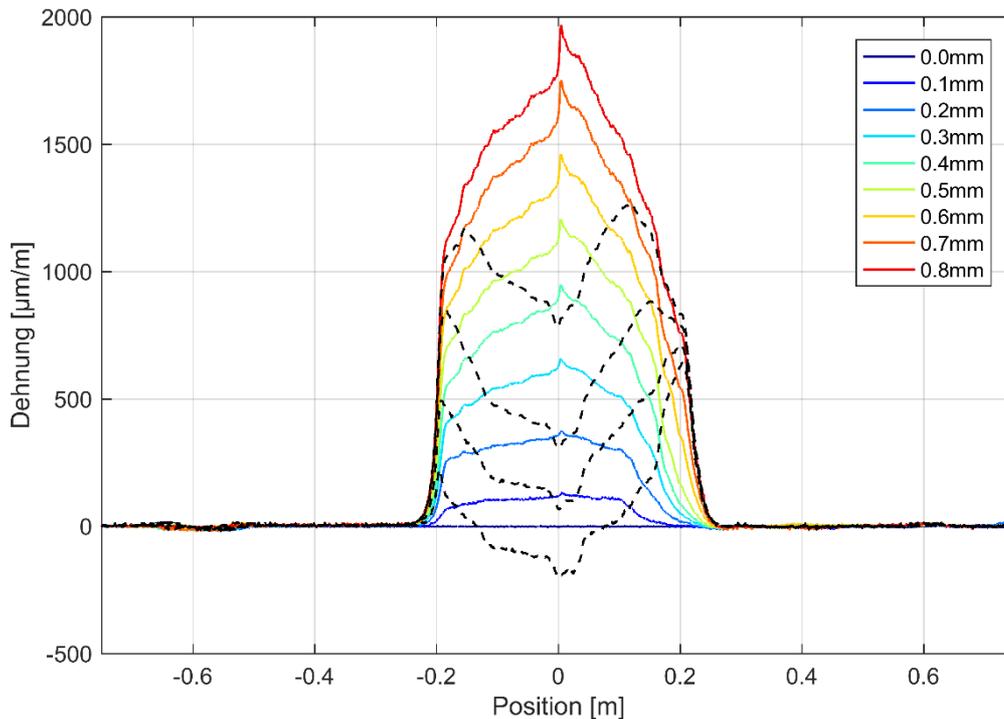


Abbildung 22: Darstellung der Strainprofile des Fasertyps TB während der Simulation des Erstrisses (Laborsetup S1)

Die Simulation der Rissatmung im Laborsetup S2 ist in den beiden nachfolgenden Abbildungen ersichtlich. In Abbildung 23 sind dabei die Strainprofile für alle drei Belastungszyklen einer Messlinie dargestellt. Die Strainprofile zeigen eine annähernd exakte Übereinstimmung. Die geringen Abweichungen resultieren aus einer Verkippung der Trägerplattformen zueinander. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit. Die Ergebnisse der übrigen Messlinien weisen ein analoges Verhalten auf. Der zeitliche Verlauf des rechten Peaks aus Abbildung 23 spiegelt ebenfalls annähernd exakt die aufgebrachten Be- und Entlastung wieder (siehe Abbildung 24).

Im Rahmen der Kalibrierversuche konnte somit zwar eine erste Einschätzung über die Eignung und die Reproduzierbarkeit der einzelnen Fasertypen gewonnen werden, eine mögliche Verformung des Klebers sowie das Verhalten des Verbundes zwischen Kleber, Faser

und Betonoberfläche konnte hier nicht getestet werden. Daher wurden die vorab ausgewählten Fasertypen nochmals im Zuge der Tests an einem Bauteil unter realen und kontrollierten Belastungsbedingungen, sowie unterschiedliche Applikations- Klebearten getestet.

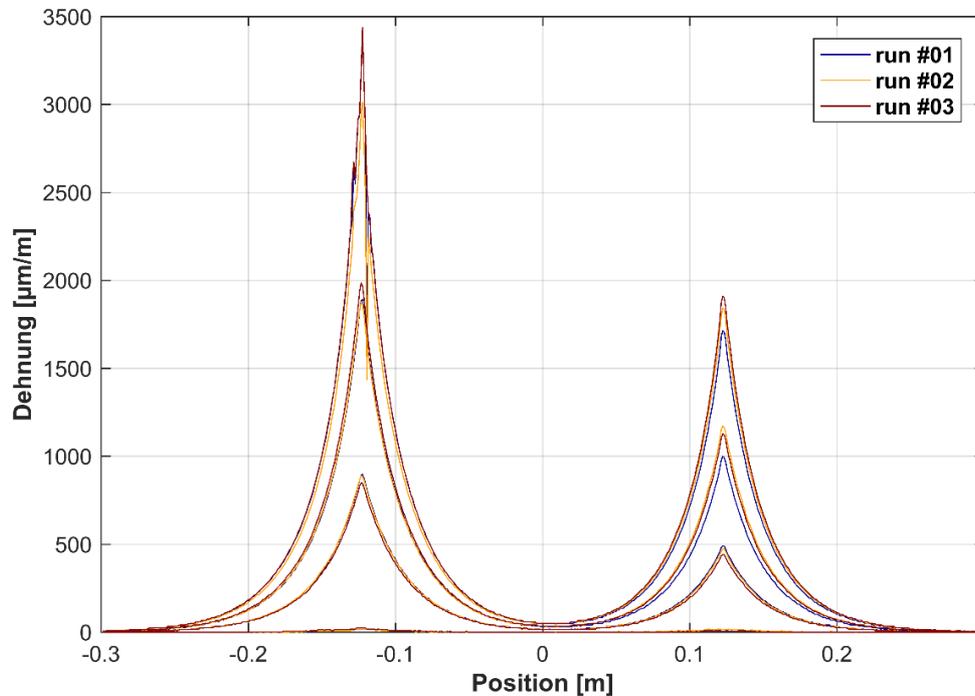


Abbildung 23: Darstellung der Strainprofile einer Messlinie für alle drei Belastungszyklen (Laborsetup S2)

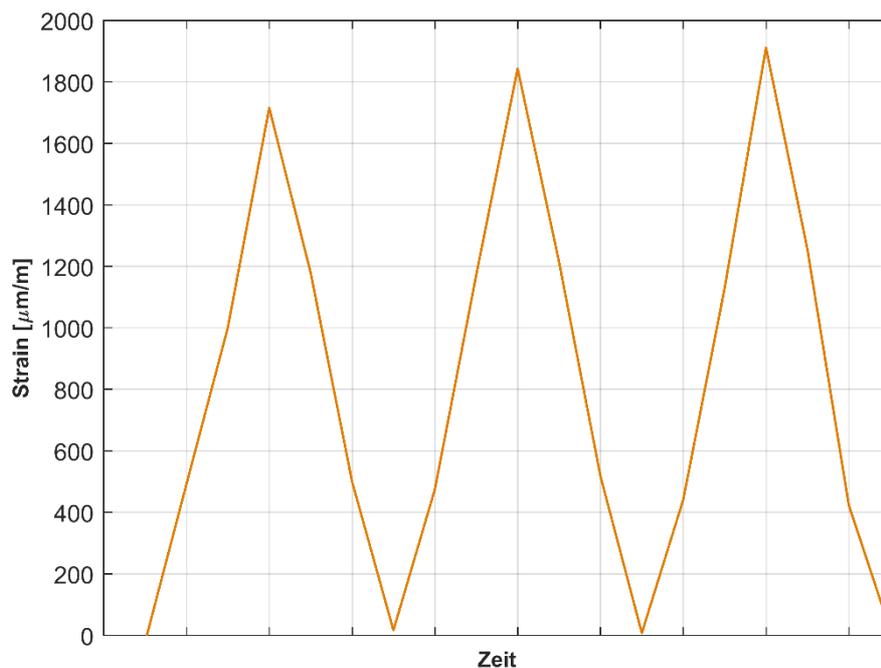


Abbildung 24: Zeitlicher Verlauf des rechten Peaks aus Abbildung 23 (Laborsetup S2)

4 TESTVERSUCHE ZUR RISSERFASSUNG AN EINEM BAUTEIL

Im Rahmen der Testversuche an einem Bauteil wurden insgesamt drei Versuchsbalken getestet, die mit den vorab ausgewählten Sensorfasertypen und Klebern in unterschiedlichen Varianten bestückt wurden. Um die Genauigkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit der ausgewählten Sensorik hinsichtlich der Bestimmung der Rissbreite, des Rissbildes und des Einflusses der Orientierung des Risses in Bezug auf die Faserachse zu bestimmen, wurden die Versuchsbalken statischen und zyklischen Belastungen unterzogen.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Applikationsvarianten und der Belastungsversuche werden in den nachfolgenden Kapiteln genauer erläutert.

4.1 Allgemeines

Die Belastungstests der drei Versuchsbalken dienen in erster Linie dazu, die geeignete Montagemöglichkeit des faseroptischen Sensors zu finden, sodass eine optimale Übertragung der Dehnung des Bauteiles auf den Kern der Glasfaser gegeben ist, sowie nochmals eine direkte Kalibrierung des Messsystems unter kontrollierten, realen Bedingungen durchzuführen. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Erkennung des Erstrisses, der Kreuzung des Risses nicht direkt zur sensitiven Faserachse, das Monitoring der temperaturabhängigen Atmung bereits bestehender Risse, insbesondere das Schließen von Rissen, sowie eine Alterungssimulation. Des Weiteren soll der Zusammenhang zwischen Dehnung und Rissbreite ermittelt werden. Dazu wurde mit jedem der drei Betonbalken ein 3-Punkt-Druckversuch durchgeführt. Auf das Versuchsdesign sowie die Durchführung der Versuche wird in den nachfolgenden Kapiteln genauer eingegangen.

4.2 Versuchskonzept und Design

Die Probekörper sollen das Verhalten einer Tunnelinnenschale möglichst gut wiedergeben, und Öffnen und Schließen von Rissen kontrolliert ermöglichen. Aus diesem Grund wurden plattenartige Balken im 3 - Punkt Biegezugversuch (Abbildung 25) mit einer zentrischen Lasteinleitung belastet und so Risse induziert. Das Versuchskonzept sieht weiterhin vor, dass nicht nur Rissentstehung und einmalige Belastung und Rissmessung abgebildet werden sollen, sondern es muss eine mehrmalige Rissweitenbewegung („Rissatmen“) möglich sein, sowie die Rissöffnung präzise ansteuerbar sein. Unterschiedliche Faserapplikationen sollen möglich sein, neben Variation von Faser und Kleber sollen auch zum Riss geneigte Verklebungen, und Applikationen an bestehenden Rissen möglich sein.

4.2.1 Design der Versuchsdurchführung

Die Tunnelinnenschalen werden meist unbewehrt ausgeführt, dies lässt sich versuchstechnisch aber nicht umsetzen, da ein sprödes Verhalten zur exakten Rissweitenansteuerung nicht geeignet ist. Andererseits haben stahlbewehrte Betonkonstruktionen aufgrund der rissverteilenden Wirkung der Armierung eine deutlich unterschiedliche Risscharakteristik als unbewehrte Bauteile, mitunter lassen sich damit die maximalen Rissweiten nur begrenzt ausbilden, auch war unklar in welchem Abstand die Risse sich befinden dürfen um eindeutig gemessen werden zu können. Aus diesem Grund wurde eine Bewehrungsführung gewählt, wo bei einer Plattenhöhe von 25 cm die Stäbe zentrisch angeordnet werden. Dadurch entstehen entsprechend größere Rissweiten, bzw. die Verteilwirkung der Bewehrung ist damit ebenfalls untergeordnet. Zusätzlich wurde zur besseren Steuerung der Rissweite eine nachträgliche zentrische Vorspannung in innenliegenden Hüllrohre angebracht, wodurch ein mehrmaliges Be- und Entlasten über die hydraulischen Pressen gut kontrolliert aufgebracht werden kann, damit ein Rissatmen simuliert werden kann und sich die Risse wieder nahezu vollständig schließen können.

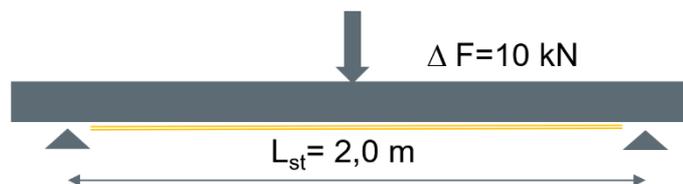


Abbildung 25. Schema Versuchs balken 3 Punkt Biegezugversuch.

Wie hier in Abbildung 25 dargestellt ist wurde die Geometrie und das Set-Up so abgestimmt, dass in der Mitte möglichst nur ein Riss auftritt, welcher kontrolliert angesteuert werden kann. Im Zuge der Versuchsumsetzung wurde am Spannfeld der Körper mit der Zugfaser oben liegend eingebracht. Damit war die Sensorik (Risswegeber) und Referenzmessung mittels Messmikroskop gut umsetzbar und die unterschiedlichen Faserapplikationen waren besser möglich. Zudem konnte der Versuch so besser beobachtet werden. Die umgesetzte Versuchsanordnung ist in Abbildung 26 schematisch dargestellt.

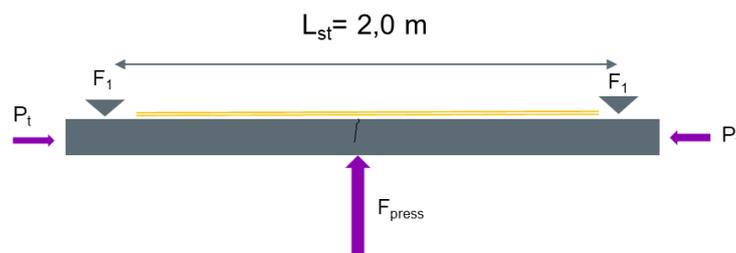


Abbildung 26. Versuchsanordnung in der Umsetzung am Spannfeld

Die Probekörper wurden schlussendlich in den Abmessungen $L=2.50\text{m}$, $B=0.90\text{m}$ und $H=0.25\text{m}$ als Fertigteile geplant. Als Betongüte war grundsätzlich ein Innenschalenbeton nach der entsprechenden ÖBV Richtlinie – „Innenschalenbeton“ mit der Betonfestigkeit C25/30 und Expositionsklasse XF3/XC3/IG F2 konzipiert- wobei die tatsächlichen Festigkeiten später abweichen können (z.B. Betonalter, Fertigung...). Auch ist davon auszugehen, dass der Bestandsbeton in realen Bauwerken durch die Nacherhärtung wesentlich fester ist. Zur Abschätzung der Versuchslasten wurde vorab eine Vorbemessung und stufenweiser Kraftaufbringung durchgeführt, und die rechnerische Betonzugspannung berechnet.

Tabelle 3 Rechnerische Betonzugspannungen bei Vorspannung $P_t=500\text{ kN}$

| Zustand 1 Bis Erstriss- bildung | | | | | rechn. Betonzugspannung |
|---------------------------------------|----------------------------|---------------|----------------------------------|-------------|------------------------------|
| F1 [kN] | F_{press} [kN] | P_t [kN] | σ_N P_t/A_c [MPa] | Mm [kNm] | $f_{ct\text{ ist}}$ [MPa] |
| 0 | 13,5 | -500 | -2,22 | 4,22 | -1,77 |
| 3,25 | 20 | -500 | -2,22 | 7,47 | -1,43 |
| 8,25 | 30 | -500 | -2,22 | 12,47 | -0,89 |
| 13,25 | 40 | -500 | -2,22 | 17,47 | -0,36 |
| 18,25 | 50 | -500 | -2,22 | 22,47 | 0,17 |
| 23,25 | 60 | -500 | -2,22 | 27,47 | 0,71 |
| 28,25 | 70 | -500 | -2,22 | 32,47 | 1,24 |
| 33,25 | 80 | -500 | -2,22 | 37,47 | 1,77 |
| 38,25 | 90 | -500 | -2,22 | 42,47 | 2,31 |
| 43,25 | 100 | -500 | -2,22 | 47,47 | 2,84 |
| 48,25 | 110 | -500 | -2,22 | 52,47 | 3,37 |
| 53,25 | 120 | -500 | -2,22 | 57,47 | 3,91 |
| 58,25 | 130 | -500 | -2,22 | 62,47 | 4,44 |

Da die tatsächliche Betonzugspannung stark streuen kann, ist im Vorfeld die rechnerische Prognose der Erstrissbildung ebenfalls nur entsprechend unscharf vorherzusagen. Die planmäßige aufgebrauchte Vorspannkraft P_t beträgt 500 kN, daraus resultiert eine Betondruckspannung von $\sigma_N = -2.22\text{ MPa}$. Eine rechnerische Versuchsobergrenze war das Erreichen des Fließzustandes in der schlaffen Bewehrung, welche abhängig von der Vorspannkraft in der Tabelle 4 berechnet wurde. Als Vergleichsfall wurde der Fall für die doppelte Vorspannkraft von $P_t = 1000\text{ kN}$ angegeben.

Tabelle 4 Rechnerische Lasten bei Erreichen der Bewehrungsfließspannung (bei $f_{yd}=550$ MPa).

| Zustand 2 | | | | |
|----------------|---------------------|---------------------------|------------|----------------------------|
| Po tot [kN] | σ_N [MPa] | Fließ- moment [kNm] | F1 [kN] | F _{press} [kN] |
| 0 | 0,00 | 38 | 33,78 | 81,06 |
| -500 | -2,22 | 80 | 75,78 | 165,06 |
| -1000 | -4,44 | 98 | 93,78 | 201,06 |

Zur Prognose der Größenordnung Rissweiten wurde eine nichtlineare Berechnung mit ANSYS Mechanical ® durchgeführt, und die rechnerische Rissweite in Abhängigkeit der Bauwerksverformung ermittelt.

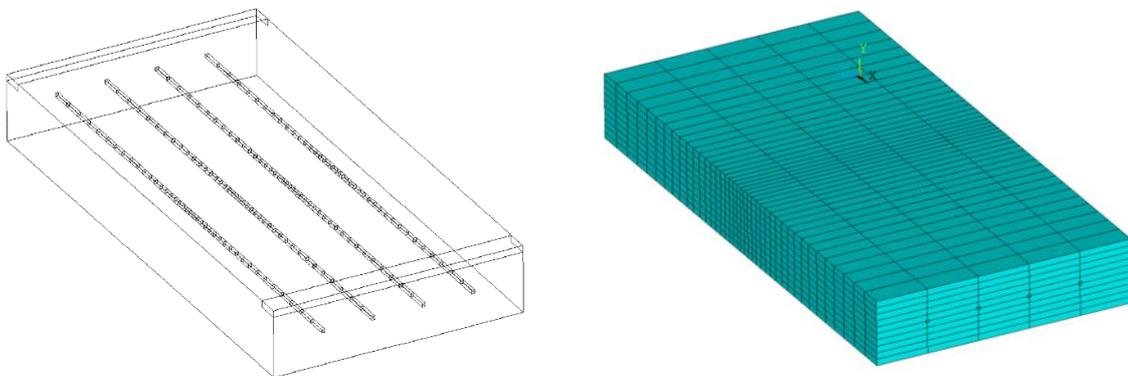


Abbildung 27. Modellbildung des Versuchskörpers in einer nichtlinearen FEM- Analyse: (vereinfachte Abmessung 2,00x1,00 m h= 0,25 m, und zentrisch bewehrt mit 4 DM 14 von unten belastet.

Die Ergebnisse der Vorbemessung sind in Abbildung 28. Theoretische Rissbreite und erwartete Durchbiegung in Plattenmitte (Von unten belastet, ohne EGW, mit hoher angenommener Zugfestigkeit) ist in Abhängigkeit der aufgebrachten Durchbiegung ersichtlich. Wobei bei dem gewählten Beton FE-modell nach der Rissbildung die errechnete Dehnung von der Elementgröße abhängig ist (je kleiner die Elemente desto größere die Dehnung/Dehnungsspitze). Die resultierenden Rissweiten berücksichtigen die gewählten Elementgrößen und sind von denen nahezu unabhängig.

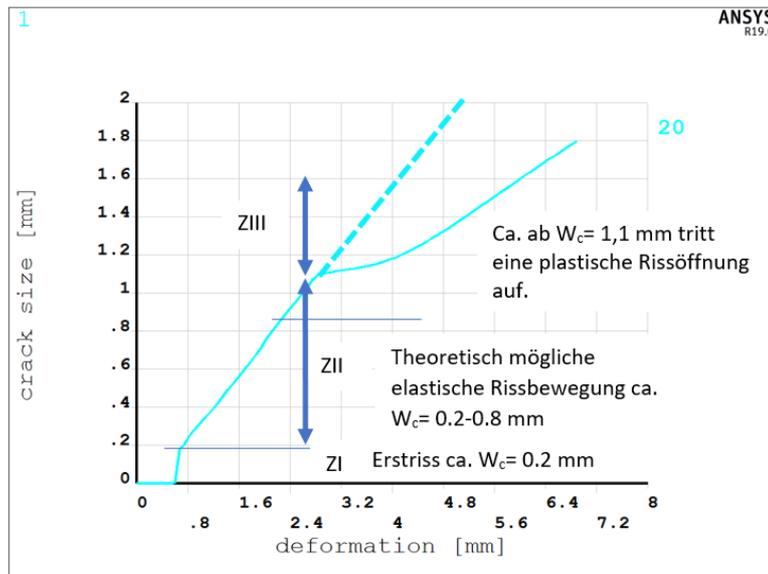


Abbildung 28. Theoretische Rissbreite und erwartete Durchbiegung in Plattenmitte (Von unten belastet, ohne EGW, mit hoher angenommener Zugfestigkeit)

Die Erstrissbildung, das zugehörige Lastniveau und damit auch Rissweite hängt von der tatsächlich auftretenden Betonzugspannung ab, welche hier im Vorfeld konservativ sehr hoch angenommen wurde, damit auch der für die Versuchsplanung der kritische Fall hohe Pressenkraft abgedeckt ist. Im realen Versuch hat sich schließlich eine Zugspannung deutlich unter 3 MPa ergeben. Die Erstrissbildung und das Rissmodell der Faser wurden im Nachgang im Detail noch analysiert und ist im Arbeitspaket 4 ersichtlich.

Im Nachfolgenden werden die einzelnen Schritte des planmäßigen Versuchsablaufs, welcher für alle drei Versuchskörper ident ist, erläutert. Ausgangslage stellen die bereits mit faseroptischen Sensoren ausgestatteten und in der Versuchsvorrichtung eingebauten (mit Fasern ausgestattete Seite nach oben) dar:

1. **Aufbringen der zentrischen Vorspannkraft** von bis zu $P_0 = 500 \text{ kN}$ ($\sigma_N = -2.22 \text{ MPa}$). Beide Spannglieder werden gleichzeitig vorgespannt, es erfolgt die Bestimmung der Vorspannkraft über den gemessenen Hydraulikdruck (auf ca. $\pm 3\%$ genau) und Messen des Vorspannvorganges mit DFOS:
 - Ende Vorspannvorgang
 - Fixieren des Spannglieds (Abfall)

2. **Detektion der Rissentstehung/ Erstriss:** Die Belastung erfolgt von unten weggesteuert bis zur Erstrissbildung: Rechenwert der Rissweite $W_c = \text{ca. } 0.1 \text{ bis } 0.2 \text{ mm}$

- (bei $P = 500 \text{ kN}$), die erforderliche Kraft von unten F_{press} beträgt 100 bis 150 kN (abhängig nach tatsächlich erreichbarer Betonzugfestigkeit). Messung der Erstrissweite mit DFOS und Durchführung einer Referenzmessung:
- a. Schrittweise Belastung in F_{press} in 10 kN Schritten (weggesteuert, Geschwindigkeit nach Erfahrung des Labors für konstruktiven Ingenieurbau (LKI)) und Messung der Dehnungszustände mit DEFOS ERSTRISSBILDUNG nach jedem Belastungsschritt. Halten der Verformung für ca. 2-3 Min vor jeder Messung.
 - b. Nach erfolgtem Erstrissbildung werden die Sensoren für eine Referenzmessung zur Verifikation aufgebracht. Die gewählten Sensoren sind Wegaufnehmer (über die Breite verteilt), Setzdehnungsaufnehmer am Rand, sowie Messmikroskop (manuell).
3. **Aufbringen von 5 Be- und Entlastungszyklen** nach erfolgter Rissbildung bis nahe der Fließgrenze der Bewehrung zur Simulation der Rissatmung und Bestimmung einer eventuell vorliegenden Hysterese
- a. Schrittweise Aufbringen der Verformung. Die Steuerung erfolgt grundsätzlich weggesteuert. Die betrachteten Zielrissweiten liegen im Bereich von $w_{c \text{ min}} = 0.2$ und $w_{c \text{ max}} = 0.8$ mm, um eindeutig im Zustand ZII zu bleiben. Die gewählte Schrittweite Δw_c beträgt ca. 0.2 mm. Es erfolgt in jedem Be- und Entlastungsschritt eine Messung der Dehnung mit DFOS und wird zusätzlich mit einer Referenzmessung (Wegaufnehmer/ Setzdehnungsaufnehmer und Mikroskop) verifiziert.
4. **Alterungssimulation/ Ermüdung** der Verklebung der Messtechnik durch Aufbringen einer sinusförmigen Last mit einer Schwingamplitude von ca. 0.4 bis 0.8 mm Rissweite
- Ansatz 1 Wechsel pro Tag ca. 25 Jahre => gewählt 10000 Lastwechsel**
- DFOS Dauermessung
 - Referenzmessung Rissweiten
5. **Wiederholung der 3 Be- und Entlastungszyklen**
Bestimmung eventueller Hysterese nach der Alterungssimulation
6. **Belastung bis zum Bruch** der Glasfaser bzw. Zerstörung soweit in Versuchsdurchführung möglich bzw. sinnvoll)

4.2.2 Fertigung der Probekörper

Die Probekörper wurden von der Firma MABA von 26-29.11.2018 nacheinander betoniert. Und nach entsprechender Aushärtung am Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der TU-Graz angeliefert. Auszüge aus Plandarstellung und der Bewehrungsabnahme sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

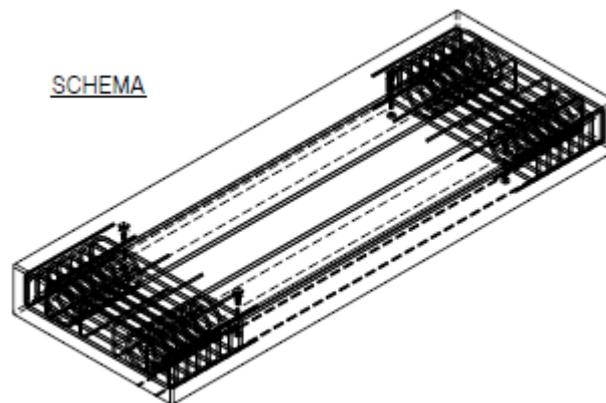


Abbildung 29: Schematische 3 D Ansicht.

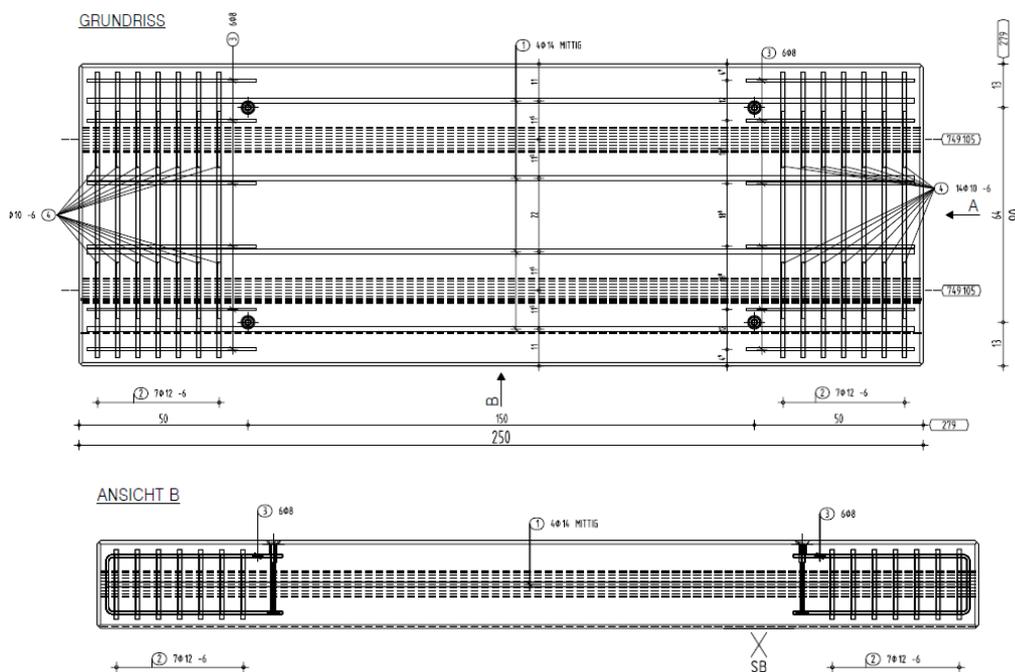


Abbildung 30: Plandarstellung der Versuchskörper oben Grundriss, unten Ansicht

SCHNITT-DETAIL NUTAUSBILDUNG

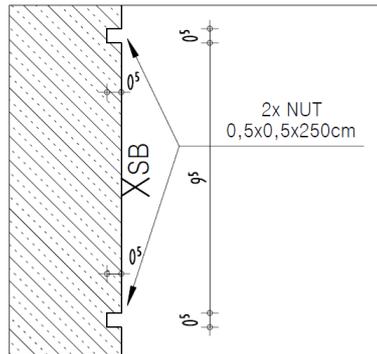


Abbildung 31: Detail Ausnehmung der Nut für die Abmessung (Einlage am Schalboden)



Abbildung 32: Foto Bewehrungsabnahme aus dem Fertigteilwerk

Die Nut wurde gleich werkseitig durch einlegen von Aussparungen in den Schalungsbo-
den (glatt beschichtet) ausgebildet, ebenso erfolgte später die Applikation der auf der
schalglatten Unterseite.

4.2.3 Konzept der Faserapplikation

Zur Untersuchung der eingangs gestellter Problemstellung wurden die drei Versuchsbalken unterschiedlich bestückt.

Im Rahmen von Versuchsbalken 1 wurden unterschiedliche Applikationsarten getestet. Primär wurde dabei untersucht, ob für die zuverlässige Dehnungsüberwachung eine Nut notwendig ist, oder ob eine Applikation direkt an der Oberfläche möglich ist. Zudem wurden die sieben vorab ausgewählten Kleber getestet. Auf diesem Versuchsbalken wurde nur die Faser des Typs TB mit einer Ausrichtung von 90° zum Riss appliziert.

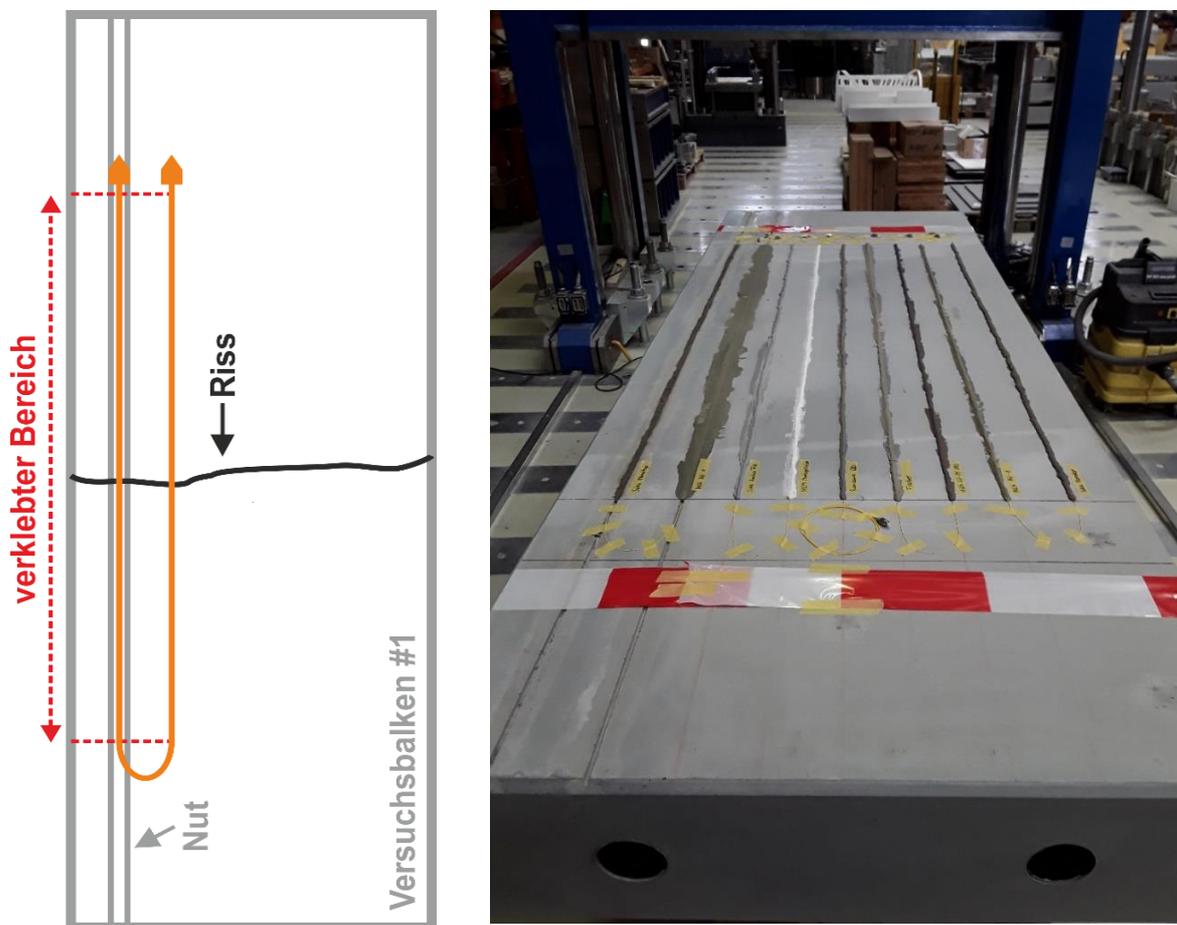


Abbildung 33: Schematische Darstellung der applizierten Fasern (links) und Darstellung der Applikation mit unterschiedlichen Klebern (rechts)

Da sich im Zuge von Versuchsbalken 1 der Ankerkleber als am geeignetsten herausstellte, wurde ausschließlich dieser für die Versuchsbalken verwendet.

Bei Versuchsbalken 2 wurden zwei unterschiedliche Fasertypen (TB und Neubrex) sowie eine unterschiedliche Ausrichtung der sensitiven Faserachse, in Winkeln von 30°, 60° und 90° zum Riss (siehe Abbildung 34) untersucht.

Des Weiteren wurde nachdem der Erstriss entstanden war bei einer Rissöffnung von 0.8 mm eine Nachapplikation durchgeführt, um zu untersuchen, ob die Schließung eines Risses ebenfalls erfasst werden kann.

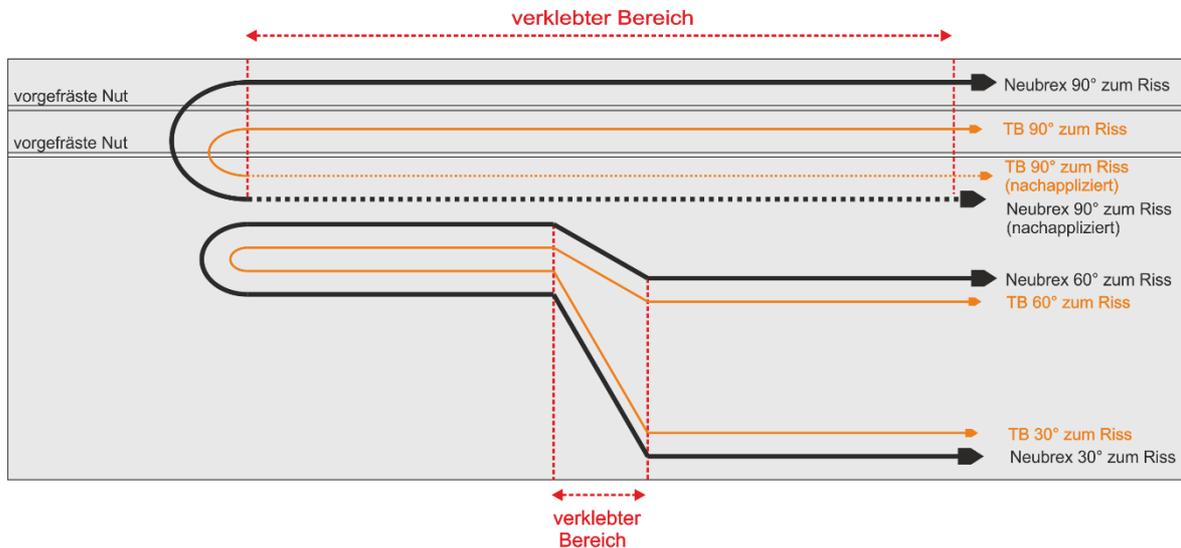


Abbildung 34: Schematische Darstellung der Applikation von Versuchsbalken 2

Versuchsbalken 3 wurde annähernd ident zu Versuchsbalken 2 ausgestattet. Es wurden lediglich zu den Fasertypen TB und Neubrex noch die Fasern vom Typ FiMT und HBM appliziert, wie in Abbildung 35 schematisch dargestellt.

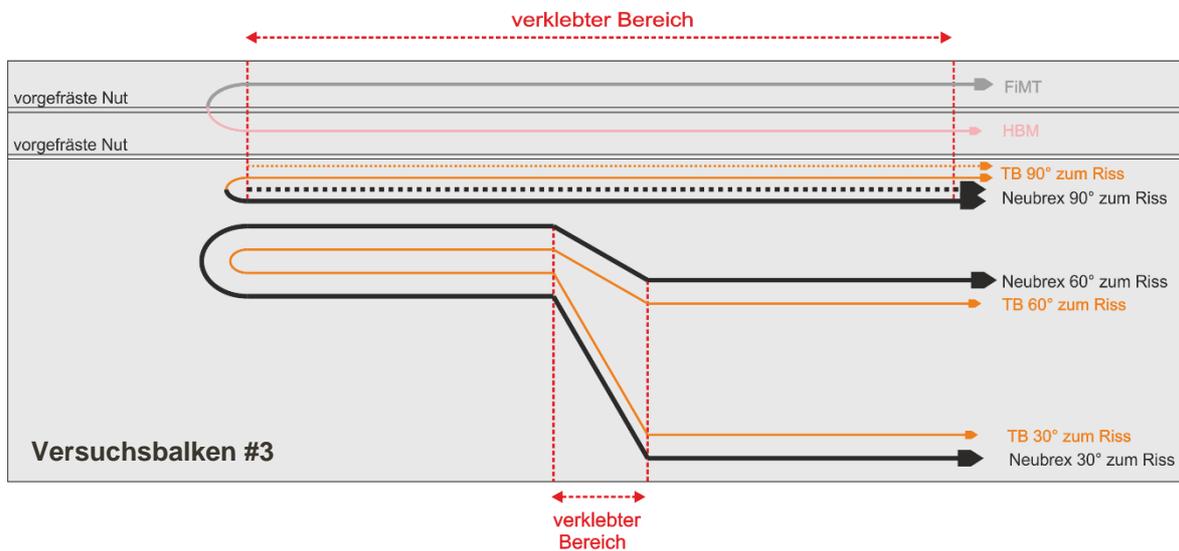


Abbildung 35: Schematische Darstellung der Applikation von Versuchsbalken 3

Der verklebte Bereich beträgt dabei für die im 90° zum Riss applizierten Fasern 1.5 m, für die in einem Winkel von 60° und 30° Fasern ist der Bereich entsprechend kürzer.

4.3 Applikation der Sensorfasern

Für die Applikation der Sensorfasern wurde der Versuchsbalken zunächst durch Absaugen von Schmutz und Staub befreit. Anschließend wurde die Führung der faseroptischen Sensoren angezeichnet, die Faser mit Alkohol gereinigt und temporär mit Klebeband gegen Verrutschen fixiert. Das Aufbringen des Klebers erfolgte mit einer Kartuschenpresse (siehe Abbildung 36).

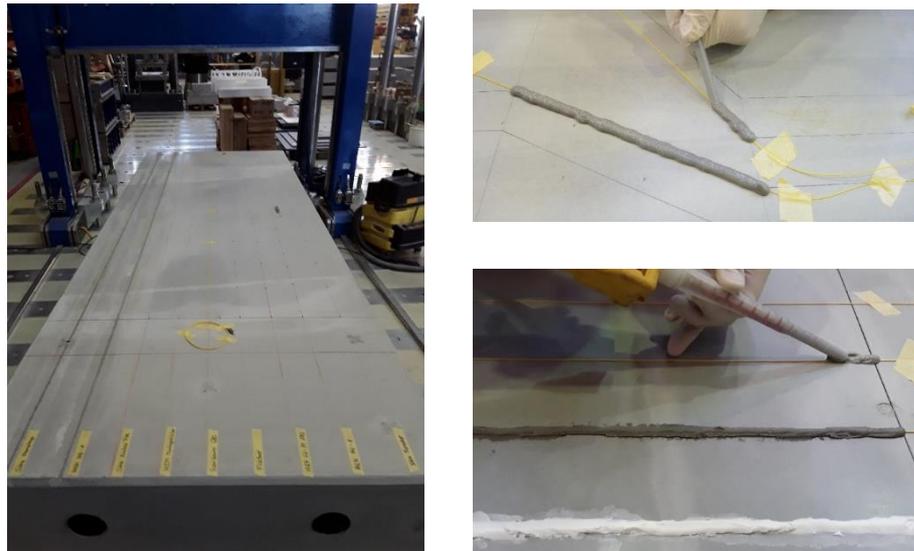


Abbildung 36: Vorbereitung und Anzeichnen der Faserführung (links) und Verkleben der Fasern auf der Oberfläche (rechts)

Nach der Applikation wurden an die Enden der Fasern faseroptische Stecker angespleißt und eine Kontrollmessung durchgeführt, um sicher zu stellen, dass die Fasern während der Montage nicht beschädigt wurden (siehe Abbildung 37).



Abbildung 37: Anspleißen von Steckern zur Verbindung mit dem Messinstrument (links) und Kontrolle auf Beschädigungen mittels eines OTDR (rechts)

4.4 Versuchsdurchführung

Die Belastungstests wurden im Bautechnikzentrum (BTZ) der TU Graz unter kontrollierten Bedingungen und für alle drei Versuchsbalken ident durchgeführt, um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erzielen zu können.

4.4.1 Ablauf der Belastungstests

Die Lastaufbringung erfolgte mittels einer hydraulischen Presse auf die Unterseite des Versuchsbalkens, wie in Abbildung 38 ersichtlich.

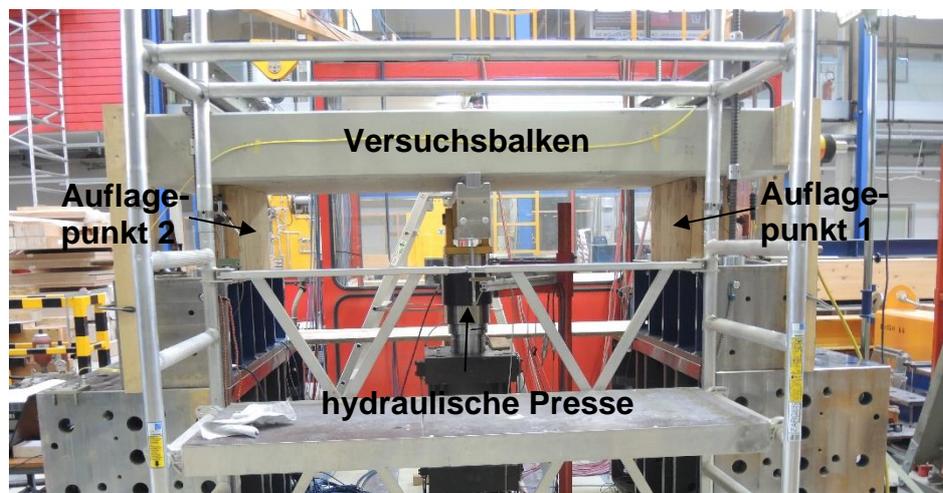


Abbildung 38: Lastaufbringung durch eine hydraulische Presse von unten

Die Versuchsbalken wurden in der zuvor festgelegten Reihenfolge 1 – 3 getestet. Um im Zuge von Versuchsbalken 1 die geeignetste Applikationsvariante eingehend durch Analyse der Messdaten zu untersuchen, wurde der Versuch von Versuchsbalken 2 erst in einem zeitlichen Abstand von 3.5 Wochen zu Versuchsbalken 1 durchgeführt. Die Belastungsversuche von Versuchsbalken 3 fanden eine Woche nach Versuchsbalken 2 statt.

Der Belastungstest dauerte für Versuchsbalken 1 zwei Tage und umfasste, wie vorab bereits schon beschrieben, im Wesentlichen eine schrittweise Belastung bis zur Erstrissbildung, eine zyklische Belastung zur Simulation der Rissatmung und eine Alterungssimulation durch Aufbringung einer Sinuslast über 10 Stunden (siehe Abbildung 39).

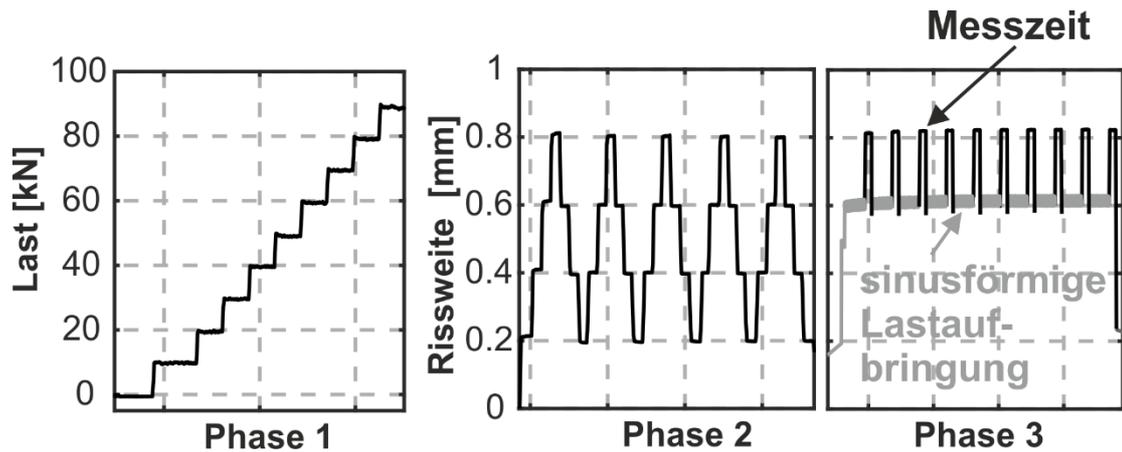


Abbildung 39: Schematische Darstellung der drei wesentlichen Phasen im Rahmen des Belastungstests

In Phase 1 wurde der Versuchsbalken in 10 kN Schritten bis zur Entstehung des Erstrisses belastet. Zur Simulation der Rissatmung wurde in Phase 2 eine zyklische Be- und Entlastung aufgebracht. Insgesamt wurden fünf Zyklen durchgeführt, wobei beginnend bei einer Rissweite von 0,2 mm in 0,2 mm Schritten bis zu einer Rissweite von 0,8 mm belastet wurde. Phase 3 stellt eine Alterungssimulation dar, um die Ermüdung der Faser und des Klebers selbst sowie die Ermüdung der Verbindung zwischen Faser, Kleber und Beton zu untersuchen. Dazu wurde eine sinusförmige Last mit einer Amplitude zwischen 0,4 mm und 0,8 mm Rissweite und einer Frequenz von ca. 0,3 Hz über einen Zeitraum von 10 Stunden auf den Versuchsbalken aufgebracht. Nach jeweils 3 Stunden wurde die Aufbringung der Sinuslast für 15 Minuten unterbrochen und statisch bei einer Rissweite von 0,8 mm gehalten, um brauchbare Messungen mittels des Luna OBR durchführen zu können. Nach Phase 3 wurde der Versuchsbalken an Tag 2 nochmals drei Belastungszyklen analog zu Phase 2 unterzogen und anschließend bis zum Bruch der Glasfasern bzw. zur maximal erfassbaren Rissweite der linearen Wegaufnehmer belastet. Während der konstanten Laststufen wurden kontinuierlich faseroptische Messungen durchgeführt. Zusätzlich wurden die auftretenden Rissbilder und Rissbreiten bei unterschiedlichen Belastungsstufen mittels einer Risslupe und linearen Wegaufnehmern unabhängig erfasst.

Die Tests der Versuchsbalken 2 und 3 dauerten aufgrund der Nachapplikation drei Tage. Der Ablauf an Tag 1 war dabei analog zu jenem von Versuchsbalken 1. An Tag 2 fand die Nachapplikation statt. Die Nachapplikation wurde bei einer Rissöffnung von 0,8 mm durchgeführt, sodass verifiziert werden konnte, ob mittels der faseroptischen Sensoren auch ein Schließen des Risses erfasst werden kann. Nachappliziert wurden Fasern vom Typ TB (\varnothing 0,9 mm) und Neubrex (4,3 mm x 1,7 mm), wobei beide in einem Winkel von 90° zum Riss aufgebracht wurden (siehe Abbildung 40).

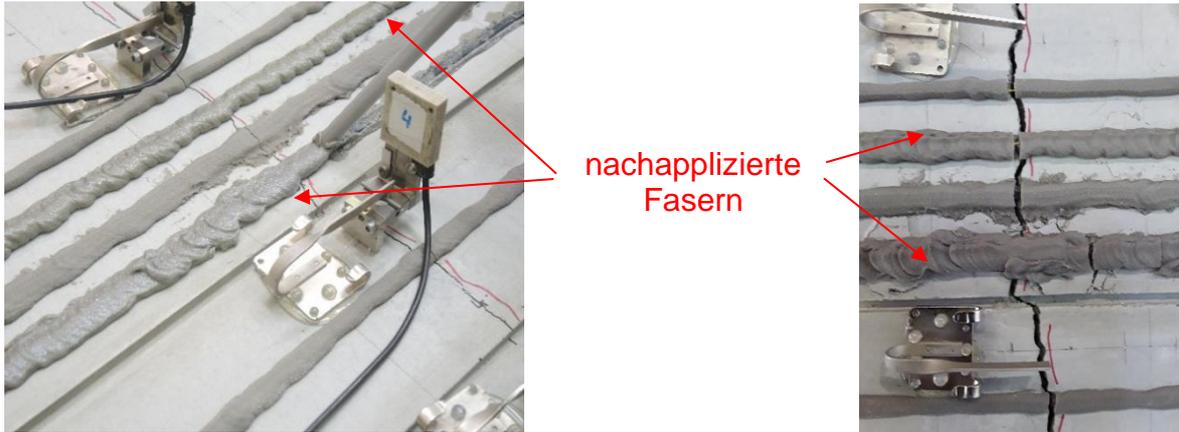


Abbildung 40: Nachapplikation der faseroptischen Sensorfasern bei einer Rissöffnung von 0.8 mm (links) und nachapplizierte Sensorfasern nach den nächsten Belastungszyklen (rechts)

An Tag 3 fand, analog zu Tag 2 bei Versuchs balken 1, die Wiederholung der Be- und Entlastungszyklen von Tag 1 sowie die Belastung des Versuchs balkens bis zum Bruch der Glasfasern statt.

4.4.2 Durchführung der Messungen

Die verteilten faseroptischen Messungen wurden mit dem in Kapitel 2 beschriebenen Luna OBR durchgeführt. Für Versuchs balken 1 wurden die einzelnen Messlinien zu einer gesamten Messlinie zusammengeschlossen und direkt an das Messinstrument angeschlossen. Bei Versuchs balken 2 und 3 wurden die Fasern an einen optischen Schalter angeschlossen, welcher über ein 1 m langes Verbindungskabel mit dem Luna OBR verbunden wurde und eine sequentielle Messung der einzelnen Messlinien ermöglicht.

Aufgrund der Sensitivität des Rayleigh-Messsystems auf Vibrationen wurde auf jeder Laststufe die Last für einige Minuten statisch gehalten, sodass zuverlässige Messungen möglich waren.

Da es sich um ein relatives Messverfahren handelt, wurde unmittelbar vor Beginn der Belastungstests der Ausgangszustand der Messfasern auf dem bereits in die Belastungsvorrichtung eingelegten, jedoch noch nicht vorgespannten, Versuchs balken gemessen. Auf diese Referenzmessung beziehen sich alle nachfolgenden Messungen. Während der Belastungsversuche wurden kontinuierlich Messungen mit dem Luna OBR durchgeführt (siehe Abbildung 41).

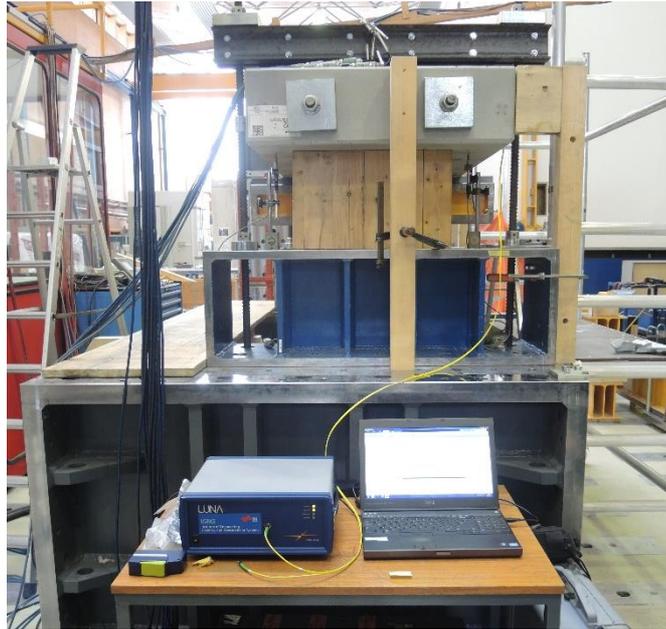


Abbildung 41: Durchföhrung der faseroptischen Messungen mittels des Luna OBR

Für die Referenzmessungen wurden an ausgewählten Stellen ebenfalls kontinuierliche Messungen mit linearen Wegaufnehmern durchgeföhrt. Zusätzlich wurden nach Entstehung des Erstrisses Positionen festgelegt, an welchen die absoluten Rissbreiten nach jeder Laststufe mittels einer Risslupe bestimmt wurden (siehe Abbildung 42).

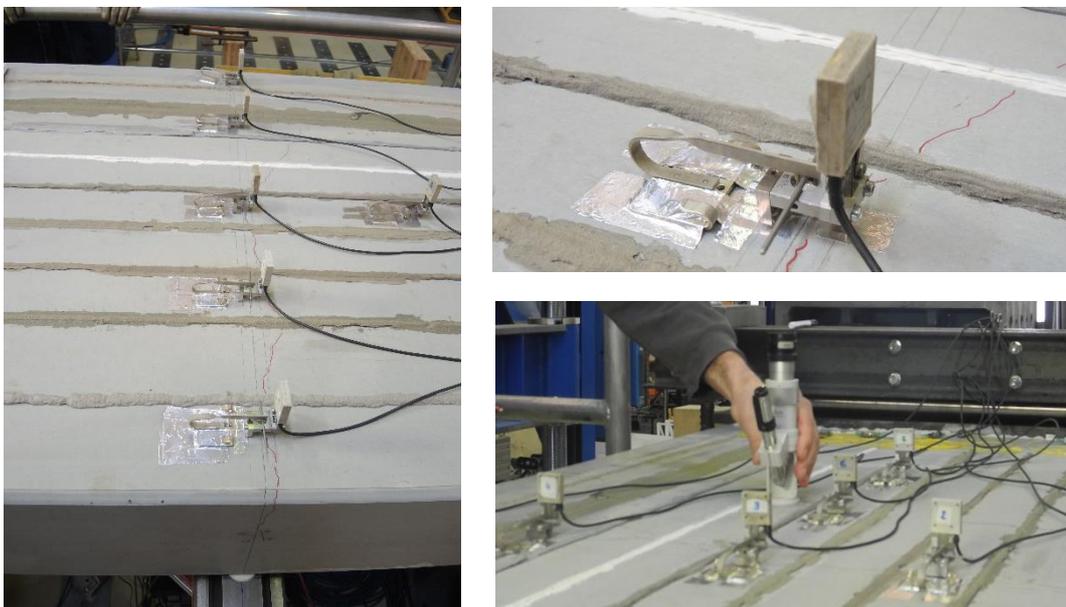


Abbildung 42: Referenzmessungen mittels linearer Wegaufnehmer (links und rechts oben) und einer Risslupe (rechts unten)

4.5 Ergebnisse

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse aus den Testversuche zur Risserfassung an einem Bauteil genauer erläutert, sowie ein kurzer Vorblick auf die numerischen Analysen, auf die anschließend in AP 4 – Bewertungsmodell im Detail eingegangen wird, gegeben.

4.5.1 Begleitende Materialtests

Versuchsbegleitend wurden auch die Betonkennwerte (Würfeldruckfestigkeit nach ON 12390, E-Modul nach ONR 23303:2010 und Spaltzugfestigkeit am 150 mm Würfel nach ON 12390-6) welche der vollständigkeitshalber immer zeitgleich mit den Versuchen getestet. Die Zusammenstellung der Werte ist in der Tabelle 5 Zusammenstellung versuchsbegleitende Materialtest ersichtlich.

Tabelle 5 Zusammenstellung versuchsbegleitende Materialtest

| | Körper 1 | Körper 2 | Körper 3 |
|----------------|---------------|---------------|---------------|
| Herstellung | 26.11.2018 | 27.11.2018 | 28.11.2018 |
| Prüfdatum | 25.01.2019 | 21.02.2019 | 26.02.2019 |
| Betonalter d | 61d | 87 d | 91 d |
| | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| $f_{c,cube,i}$ | 65,1 | 62,41 | 69,4 |
| f_c^* | 53,38 | 51,18 | 56,91 |
| E | 32.750 | 33.263 | 33.923 |
| $f_{ct,sp}$ | 3,66 | 3,94 | 3,98 |

*) Umrechnung mit Faktor 0,82 auf Zylinderdruckfestigkeit

Erkennbar ist, dass die tatsächlichen Betonfestigkeiten in den Probekörpern höher waren. Die Spaltzugfestigkeiten können nicht direkt den Zugfestigkeiten zugeordnet werden. Umrechnungsfaktoren sind beispielsweise im MC1990 mit dem Faktor 0.8 für Zylinderformen angegeben, geprüft wurde aber am Würfel, wovon auszugehen ist das die tatsächlichen Zugfestigkeiten noch niedriger sind. Die in den Testversuchen an den Platten erreichten tatsächlichen Zugfestigkeiten lagen aber wie erwartet deutlich unter 3.0 MPA.

4.5.2 Faseroptische Messergebnisse

Zur Untersuchung der Applikationsart, hinsichtlich Nut oder Oberfläche und Kleber, wurden die faseroptischen Messdaten von Phase 1 (Belastung bis zur Erstrissbildung) herangezogen. Abbildung 43 zeigt einen Vergleich der Strainprofile von Phase 1 zwischen der Applikation in einer Nut (oben) und an der Oberfläche (unten). Für eine bessere Übersichtlichkeit wurde dabei pro Laststufe nur jeweils ein Strainprofil über den verklebten Bereich des faseroptischen Sensors von 1.5 m dargestellt, wobei die Darstellung um die Position des

Erstrisses zentriert wurde. Dabei zeigt sich in erster Linie, dass das Signal an der Stelle des Erstrisses einen mehr oder weniger deutlichen Strainpeak aufweist. Im Vergleich zur Applikation an der Oberfläche ist die Dehnungsspitze für die Verklebung in der Nut allerdings deutlich geringer, was darauf zurückzuführen ist, dass eine vollständige Verfüllung der Nut und damit ein optimaler Verbund zwischen Faser und Versuchsbalken nicht gewährleistet werden kann. Daher wurden für alle folgenden Versuch die faseroptischen Sensoren ausschließlich an der Oberfläche appliziert.

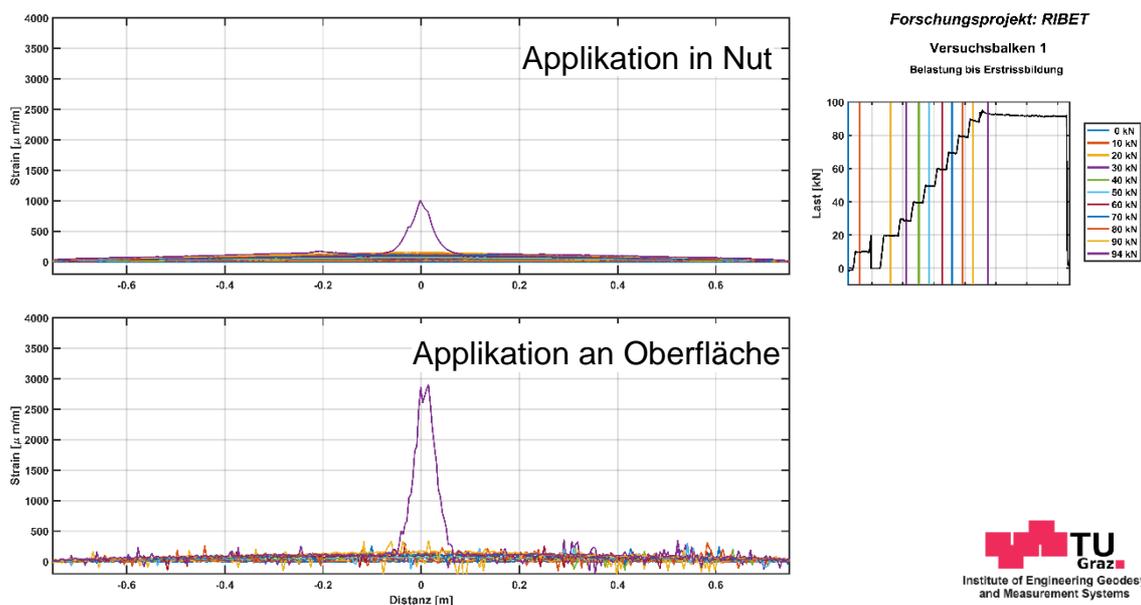


Abbildung 43: Vergleich der Strainprofile von Phase 1 (Belastung bis zur Erstrissbildung) zwischen Applikation in einer Nut (oben) und an der Oberfläche (unten) (Fasertyp TB)

In Abbildung 44 ist der Vergleich der Strainprofile während der Erstrissbildung zwischen den unterschiedlichen Klebern dargestellt. Es zeigt sich, dass nahezu bei allen Applikationsarten ein mehr oder weniger deutlicher Peak an der Stelle des Erstrisses auftritt. Lediglich beim Hilti Hit Kleber ist kein Peak ersichtlich. Eine optimale Verbindung zwischen Faser, Kleber und Betonoberfläche dürfte in diesem Fall nicht vorhanden sein. Beim Ankerkleber und Monotop stellt sich die Übertragung der Dehnung auf die Faser am besten dar und es zeigt sich ein deutlicher Strainpeak. Bei den übrigen Klebern zeigt sich der Strainpeak etwas weniger deutlich und weist einige Unregelmäßigkeiten im Peakverlauf auf. Beim AnchorFix Kleber zeigt sich sogar ansatzweise ein zweiter Peak, der jedoch nicht als zweiter Riss identifiziert werden konnte. Aufgrund der guten Übertragbarkeit und der besseren Verarbeitbarkeit wurde der Ankerkleber für die weiteren Versuche ausgewählt.

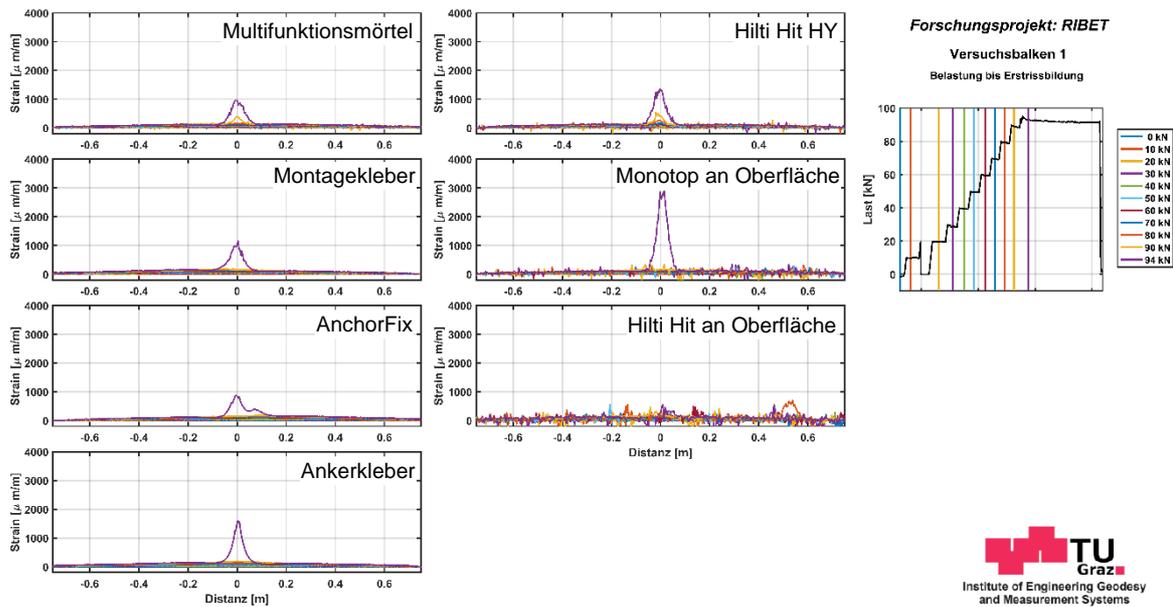


Abbildung 44: Vergleich der Strainprofile von Phase 1 (Belastung bis zur Erstrissbildung) zwischen den verschiedenen Klebern (Fasertyp TB)

Die nachfolgende Abbildung 45 zeigt jeweils ein Strainprofil pro Laststufe während der Belastung bis zur Entstehung des Erstrisses.

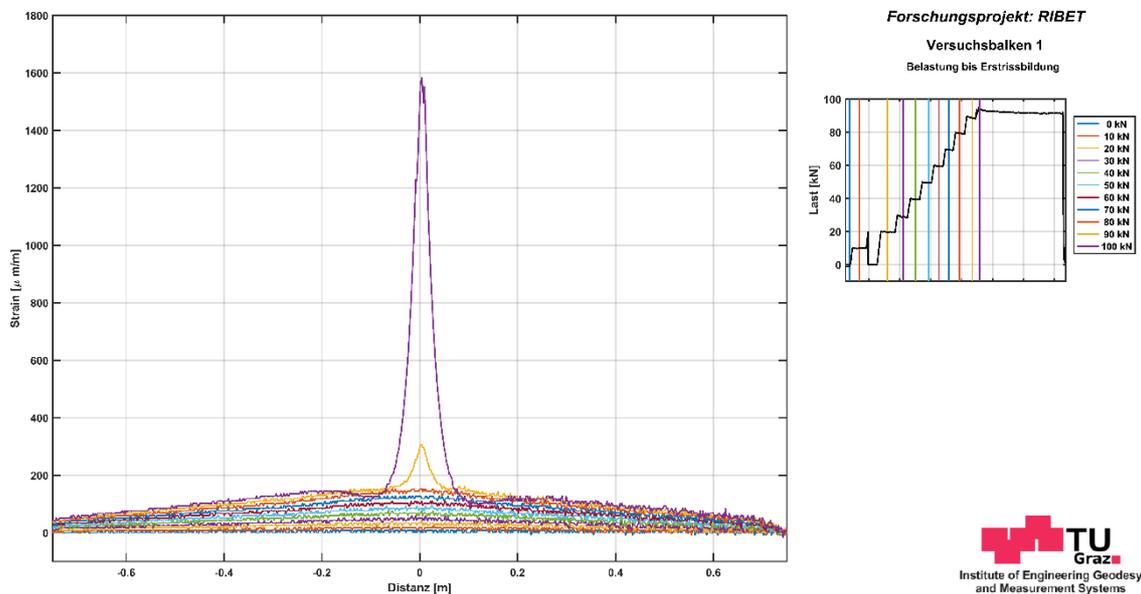


Abbildung 45: Darstellung der Strainprofile während der stufenweisen Belastung bis zur Entstehung des Erstrisses (Fasertyp TB, Ankerkleber)

Bis zu einer Laststufe von 80 kN zeigen die Strainprofile zwar eine leichte Zunahme der Dehnung, deuten jedoch noch nicht auf die Entstehung eines Risses hin. Erst nachdem der Riss tatsächlich bei einer Last von ca. 90 kN entstanden ist, zeigt sich ein deutlicher Strainpeak. Eine Vorhersage der möglichen Entstehung eines neuen Risses ist daher nicht möglich.

In Abbildung 46 wird einer der fünf Be- und Entlastungszyklen dargestellt. Die schrittweise Belastung zeigt, wie zu erwarten, aufgrund der Öffnung des Risses eine stetige Zunahme der Dehnung. Bei der Entlastung dagegen kommt es durch das Schließen des Risses nicht nur zu einer Abnahme der Dehnung, sondern es tritt ab einer Rissbreite von 0.4 mm eine Stauchung auf. Dies konnte auch im Rahmen der numerischen Analysen (siehe Kapitel 4.5.3) verifiziert werden.

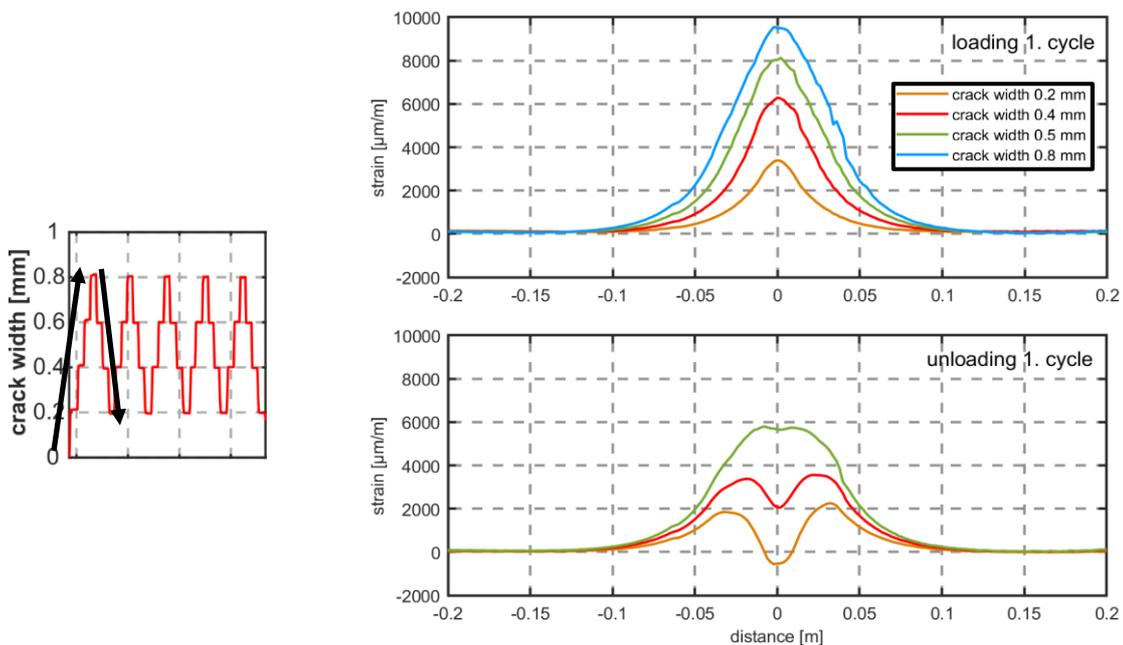


Abbildung 46: Darstellung der Strainprofile für einen Belastungszyklus (oben) und einen Entlastungszyklus (unten) (Fasertyp TB, Ankerkleber)

Durch die auftretende Stauchung bestand die Annahme, dass es zu einer Verformung von Faser und Kleber kam, die möglicherweise die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse beeinflussen könnten. Beim Übereinanderlegen der Strainprofile der fünf Be- und Entlastungszyklen bei einer Rissöffnung von 0.8 mm in Abbildung 47 zeigt sich jedoch eine annähernd exakte Übereinstimmung. Eine zyklische Belastung, welche die Rissatmung im jahreszeitlichen Verlauf simulieren soll, hat demzufolge keinen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Dehnungsmessungen. Des Weiteren zeigt sich neben dem Hauptpeak ein zweiter kleinerer Peak, welcher auf einen weiteren Riss hindeutet. Dieser Riss trat im Verlauf der fünf Be- und Entlastungszyklen auf.

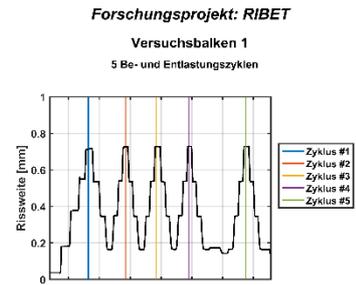
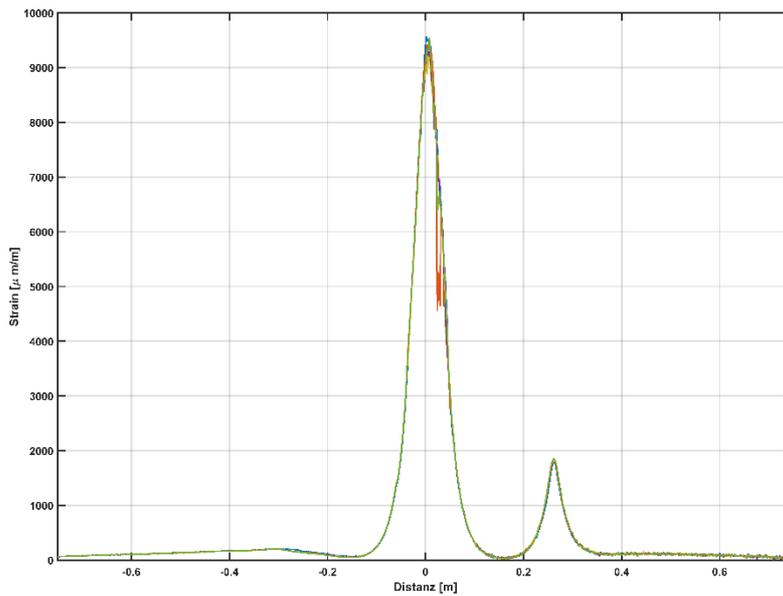


Abbildung 47: Darstellung der Strainprofile der 5 Be- und Entlastungszyklen jeweils bei einer Rissbreite von 0.8 mm (Fasertyp TB, Ankerkleber)

Auch ein Übereinanderlegen der Strainprofile während der beschleunigten Alterungssimulation bei der maximalen Rissöffnung von 0.8 mm zeigt keine Beeinflussung der Reproduzierbarkeit der erfassten Dehnungen (siehe Abbildung 48). Eine Ermüdung der Klebeverbindung oder des Sensorkabels ist demzufolge nicht erkennbar.

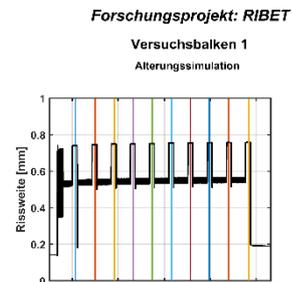
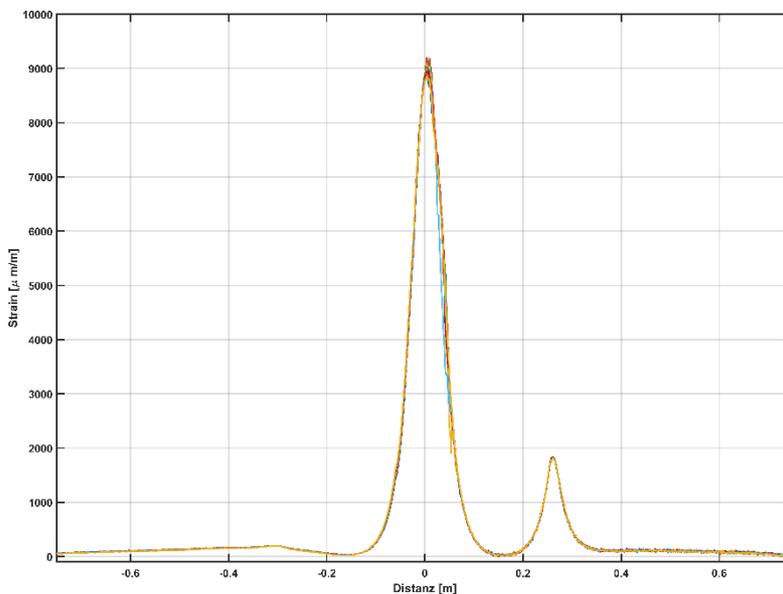


Abbildung 48: Darstellung der Strainprofile während der Alterungssimulation bei einer Rissöffnung von 0.8 mm (Fasertyp TB, Ankerkleber)

Im Rahmen der Auswertung von Versuchsbalken 2 wurde der Fokus auf die unterschiedlichen Kreuzungswinkel der Faser zum Riss gelegt. Die nachfolgende Abbildung 49 zeigt die Strainprofile für einen der fünf Be- und Entlastungszyklen für die unterschiedlichen Ausrichtungen von 90° (oben), 60° (Mitte) und 30° (unten) der sensitiven Faserachse zum Riss. Die grau hinterlegten Bereiche begrenzen dabei jeweils jenen Bereich, in welchem die Faser verklebt wurde. Zwischen der Ausrichtung von 90° und 60° zeigen sich in den Dehnungsspitzen kaum Unterschiede. Lediglich die aktivierte Länge der Messfaser wird um einige Zentimeter eingeschränkt, was sich in der geringen Peakbreite zeigt. Bei einer Ausrichtung von 30° zeigen sich neben einer weiteren Verringerung der Peakbreite auch deutliche numerische Unterschiede in den Dehnungsspitzen. Die Dehnungsspitzen sind dabei zum einen um ca. 50% geringer und zum anderen weisen diese erheblichen Störungen auf. Ursächlich dafür ist die nicht parallele Ausrichtung der sensitiven Faserachse zur Dehnungsrichtung, wodurch ein Versatz der Faser entsteht.

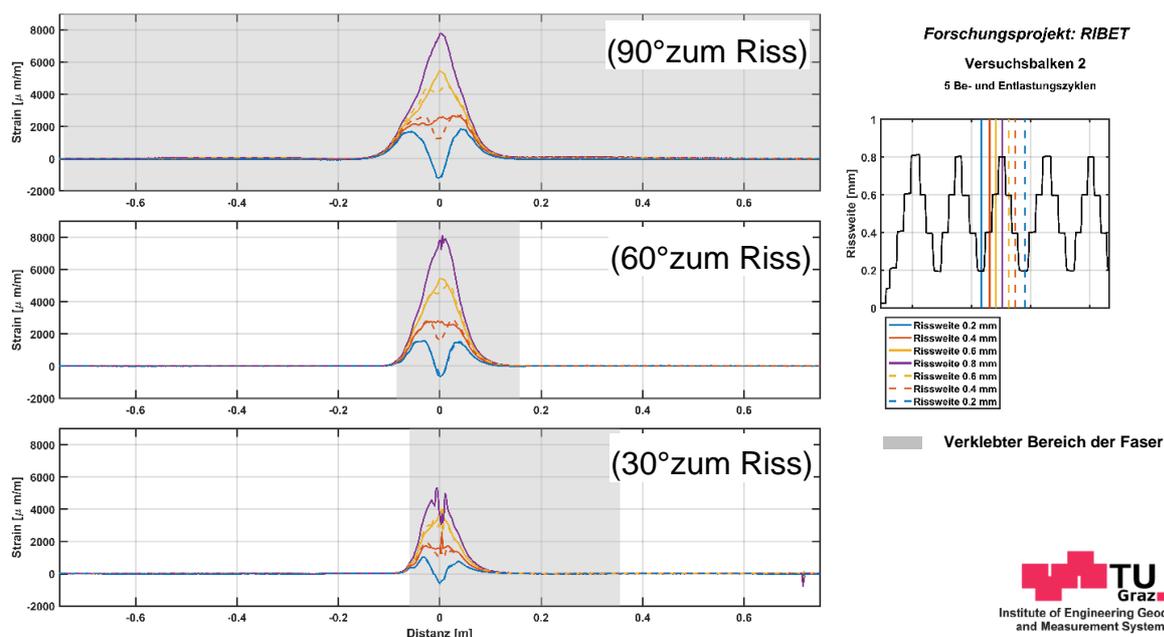


Abbildung 49: Gegenüberstellung der Strainprofile für einen Be- und Entlastungszyklus bei unterschiedlichen Ausrichtungen der Faserachse von 90° (oben), 60° (Mitte) und 30° (unten) zum Riss (Fasertyp TB, Ankerkleber)

Die Reproduzierbarkeit ist, trotz der nicht parallelen Ausrichtung der Faserachse zur Dehnungsrichtung dennoch gegeben, wie in nachfolgende Abbildung 50 ersichtlich.

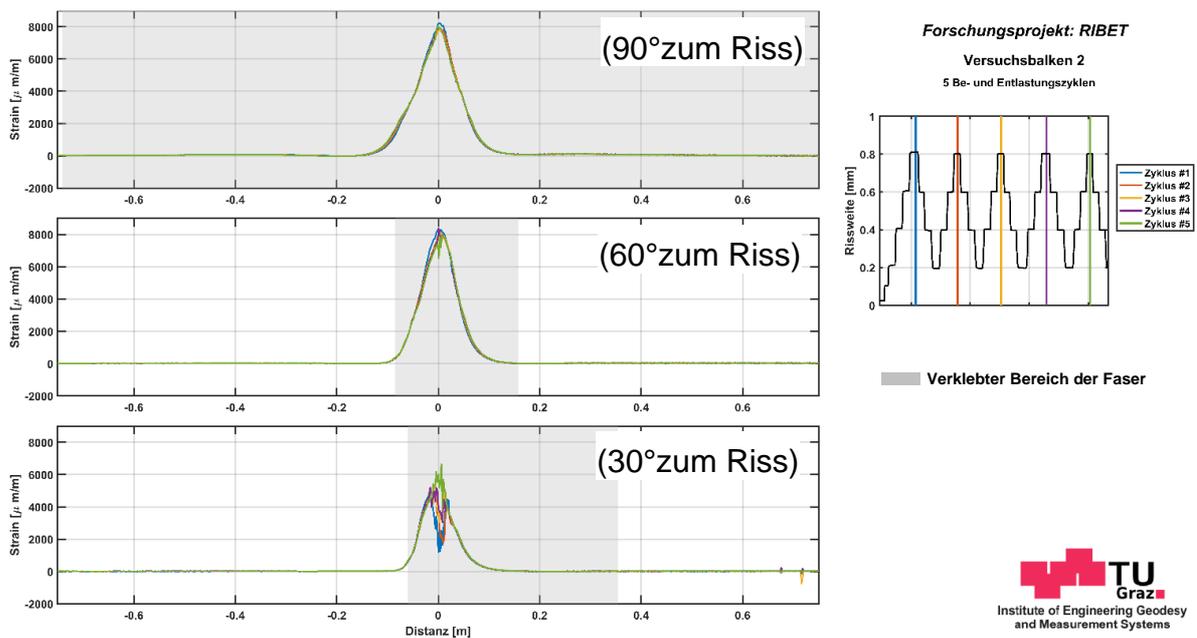


Abbildung 50: Darstellung der Strainprofile der 5 Be- und Entlastungszyklen jeweils bei einer Rissbreite von 0.8 mm bei unterschiedlicher Ausrichtung der Faserachse von 90° (oben), 60° (Mitte) und 30° (unten) zum Riss (Fasertyp TB, Ankerkleber)

Bei der Auswertung von Versuchsbalken 3 wurde der Schwerpunkt auf die Wahl der geeigneten Sensorfaser sowie die Erfassung von Stauchungen bei der Nachapplikation über einen bestehenden Riss gelegt. Die Applikation erfolgte dabei für alle Sensorfasern immer mit einer Ausrichtung von 90° zum Riss.

Die nachfolgende Abbildung 51 zeigt die Strainprofile für einen Be- und Entlastungszyklus für die vier in Kapitel 2 vorausgewählten Sensorfasern FiMT, HBM, Neubrex und TB. Beim Sensorfasertyp Neubrex kommt es zu einer starken Verschmierung des Risses und ein eindeutiger Peak ist nicht ersichtlich. Die Messungen mittels des Sensorfasertyps HBM zeigen zwar einen deutlichen Strainpeak, jedoch weist dieser Störungen auf. Die Ursache liegt hierfür in der zu hohen Sensitivität dieses Fasertyps. Zudem besitzt diese Faser eine geringe Elastizität, was zu einem raschen Bruch der Faser geführt hat. Der Fasertyp FiMT weist wie der Fasertyp TB einen eindeutigen und symmetrischen Strainpeak auf, jedoch ist dieser im Vergleich zur TB etwas breiter. Dies liegt an der Metallummantelung der FiMT, wodurch sich das Signal etwas verschmiert und eng zusammenliegende Risse nur schwer differenziert werden können. In Anbetracht dessen hat sich der Fasertyp TB als der geeignetste erwiesen.

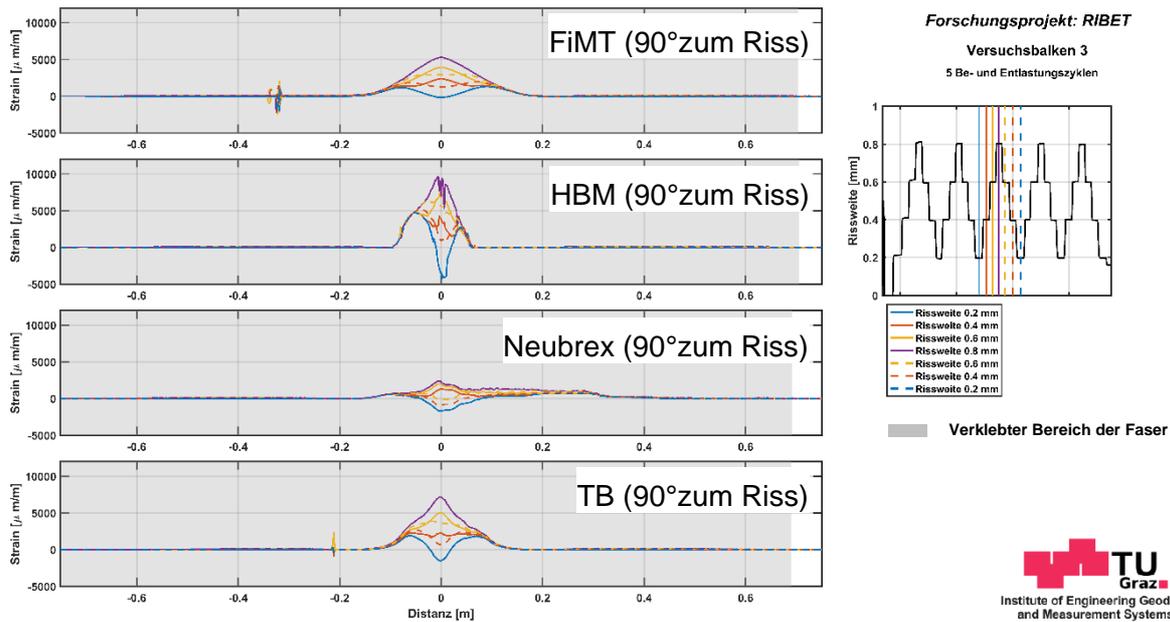


Abbildung 51: Darstellung der Strainprofile für einen Be- und Entlastungszyklus für die vier unterschiedlichen Fasertypen FiMT, HBM, Neubrex und TB (Ankerkleber)

Die nachfolgende Abbildung 53 zeigt die Strainprofile eines Be- und Entlastungszyklus zum einen für die bei maximaler Öffnung des Risses nachapplizierte Sensorfaser (oben) und der vorab applizierten Sensorfaser (unten).

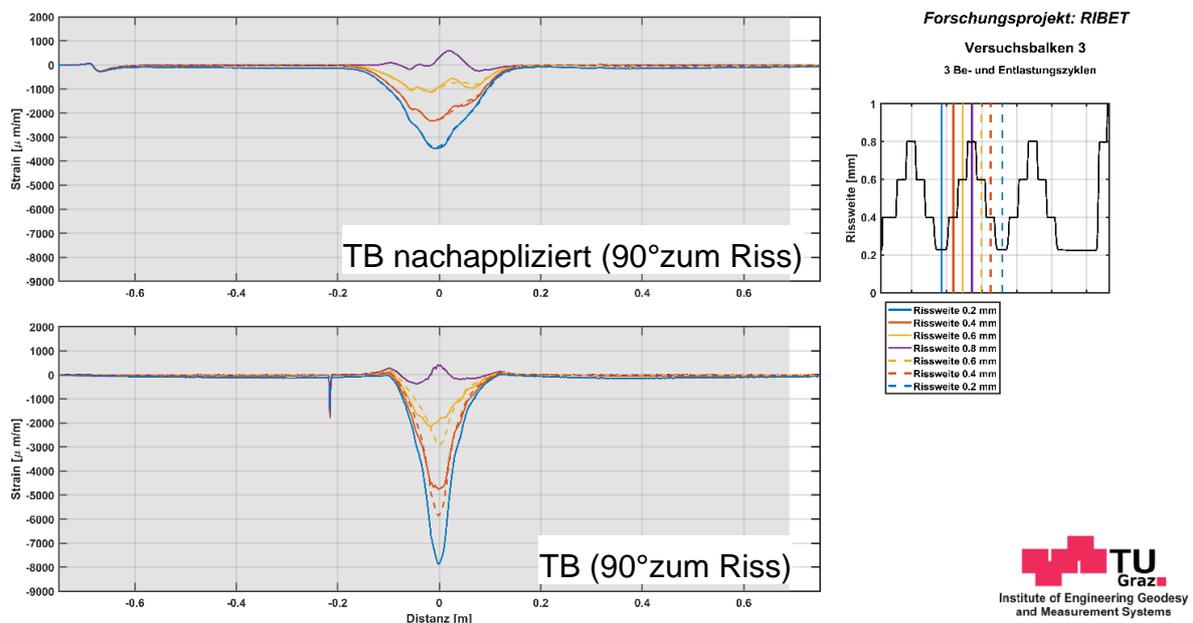


Abbildung 52: Darstellung der Strainprofile für einen Be- und Entlastungszyklus für eine nach der Rissentstehung und einer vor der Rissentstehung (unten) applizierten TB (zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Strainprofile der vorab applizierten TB invertiert).

Beide Sensorfasern wurden mit einer Ausrichtung von 90° zum Riss aufgebracht. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Strainprofile der vorab applizierten Sensorfaser invers dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass auch bei einer Nachapplikation Rissweitenänderungen erfasst werden können. Die numerischen Dehnungsspitzen sind im Vergleich zur vorab applizierten Faser allerdings um etwa die Hälfte geringer. Dies liegt daran, dass bei einer Applikation vor der Rissentstehung die Sensorfaser bereits vorgespannt wird und dadurch Stauchungen besser erfasst werden.

Die maximalen Dehngrenze der Sensorfasern wurde während der gesamten Versuche nie erreicht. Auch Dehnungen über eine absolute Rissweite von 2.6 mm während des letzten Belastungszustandes konnten problemlos erfasst werden. Ein limitierender Faktor stellte jedoch bei allen Versuchsbalken die Entlastung bei Rissweiten über 2.6 mm dar. Dabei kam es bei allen Versuchsbalken beim Entlasten auf 0.8 mm zum Bruch der Glasfasern. In der Anwendung im Tunnel sind derart große Stauchungen eine äußerst seltene Ausnahme. Trotzdem wird für die spätere Anwendung im Tunnel eine Applikation zu einem Zeitpunkt, an dem die Risse weitest möglichst geschlossen sind (dies wäre im Sommer) empfohlen.

4.5.3 Numerische Nachrechnung

Im Zuge einer numerischen Simulation wurde das Dehnungsverhalten der Glasfaser im Zuge der unterschiedlichen Rissphasen im Detail untersucht, um damit die mechanischen Vorgänge und Ursachen besser nachvollziehen zu können. Die Ursachen der Rissbildung sind nicht im Vordergrund, zur Modellvereinfachung wurde der Riss künstlich modelliert. Der Fokus lag auf die Untersuchung des mechanischen Verhaltens der Messfaser bei den unterschiedlichen Rissphasen bzw. Öffnungsweiten und Vorgängen. Es wurde ein Modell definiert, dass das Verhalten der Glasfaser auf dem Beton bestmöglich wiedergibt. Die Faser wurde explizit als ein eigenes Element modelliert und mit dem Beton nichtlinear gekoppelt. Diese Vorgangsweise wurde analog zur üblicher Verbundmodellierung zwischen Beton und Bewehrung ausgeführt. Die Bestimmung der rechnerischen Verbundeigenschaften, wurden basierend auf den Versuchsdaten von vier Rissweitzustandes bei Erstbelastung ermittelt und upgedatet werden, alle anderen Rissweitzustände können damit nachvollzogen und berechnet werden. Die Vergleiche zwischen Berechnung (gestrichelte Linie) und Versuche (durchgängige Linie) für Erstbelastung, Entlastung und weiteren Belastungen sind in den folgenden Abbildung 53, Abbildung 54 und Abbildung 55 ersichtlich. Die gute Übereinstimmung ist eindeutig erkennbar. Das Rissprognosemodell ist weiters im Arbeitspaket 4 beschrieben.

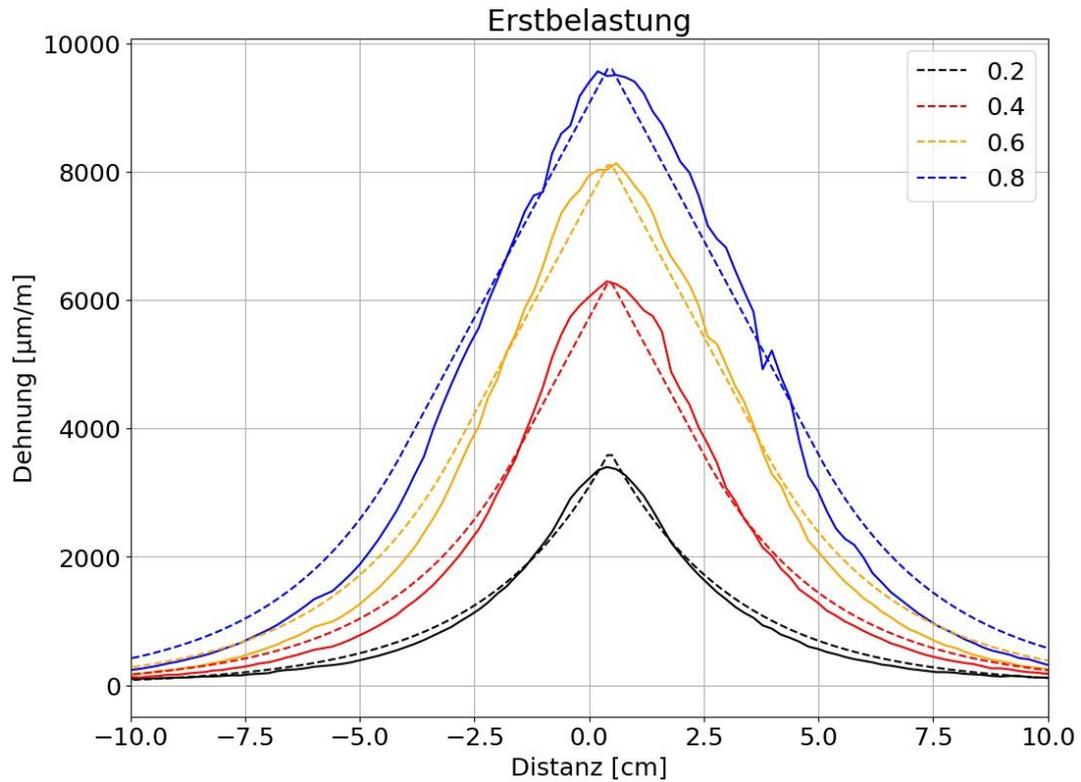


Abbildung 53: Gegenüberstellung Erstbelastung Versuch (durchgehend) und Berechnung (strichliert) bei öffnender Rissweite und Winkel 90.

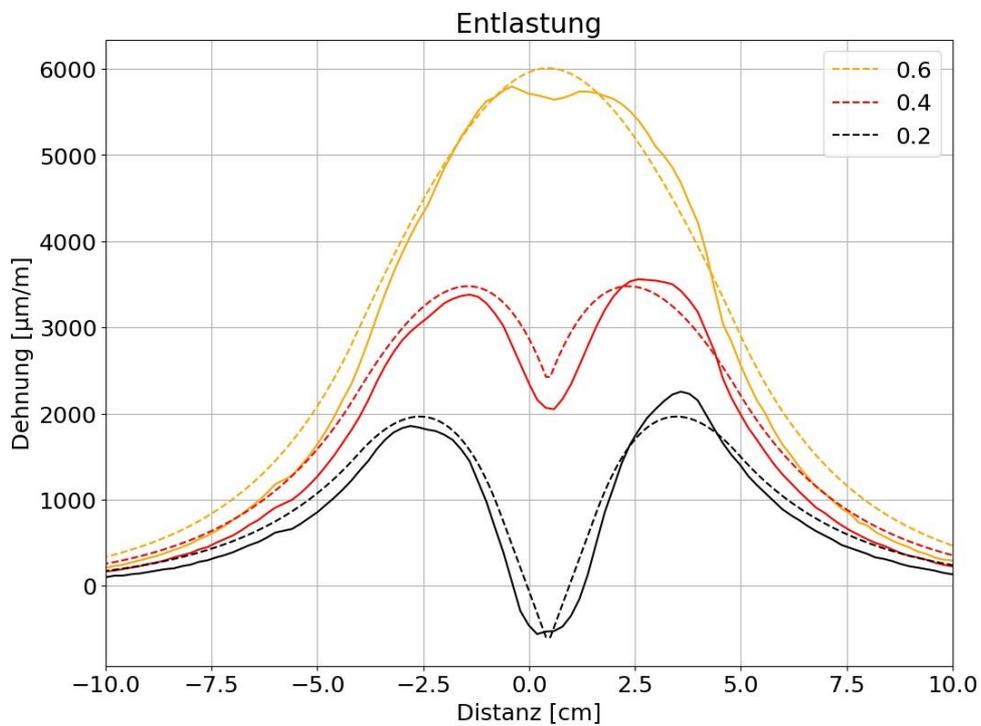


Abbildung 54: Gegenüberstellung Entlastungsvorgangs Versuch (durchgehend) und Berechnung (strichliert) bei schließender Rissweite und Winkel 90.

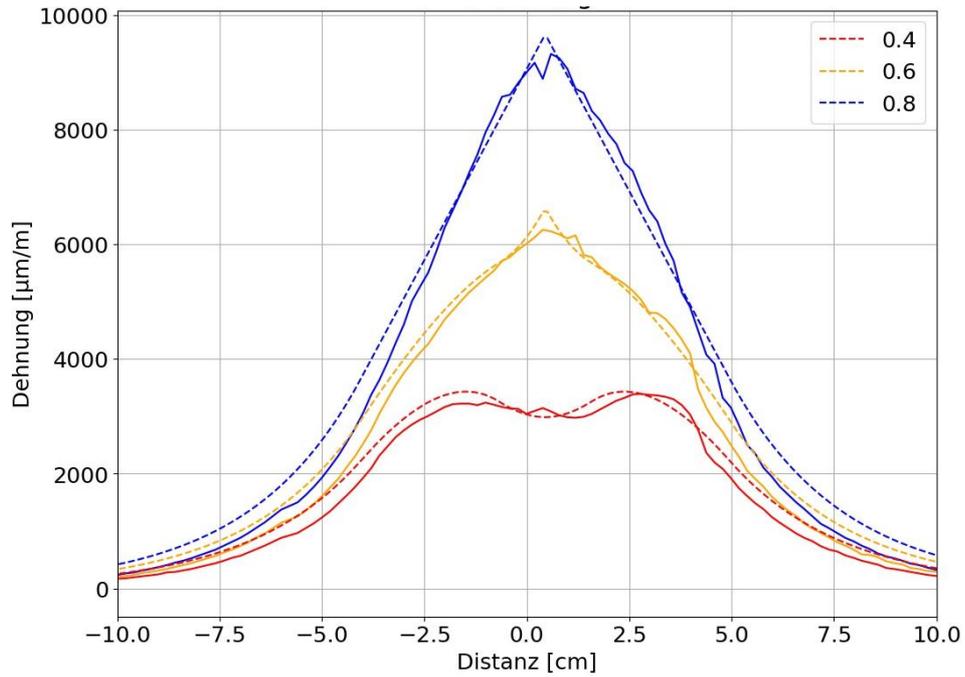


Abbildung 55: Gegenüberstellung des Wiederbelastungsvorgangs, Versuch (durchgehend) und Berechnung (strichliert) und 90° Winkel.

5 MESSMETHODIK UND DATENMANAGEMENT

Basierend auf den Ergebnissen aus den vorangegangenen Tasks kann nun ein Gesamtkonzept für ein Rissmonitoringsystem in einem realen Tunnel zusammengestellt werden. Dies beinhaltet eine geeignete Auswahl der Komponenten (Sensorfaser und Kleber), die geeignete Applikationsmethode sowie die Datenerfassung (Messintervalle) und Datenauswertung.

5.1 Komponenten

Die Wahl der geeigneten Komponenten wurde im Zuge der Laborversuche und den Versuchsbalkentests eingehend untersucht.

Als Sensorfaser stellte sich die Tight Buffered (TB) hinsichtlich ihrer hohen Sensitivität und des trotzdem ausreichenden Schutzes für eine zuverlässige Erfassung von Rissbreitenänderungen an der Objektoberfläche am geeignetsten heraus.

Für die Verklebung erwies sich der Ankerkleber am geeignetsten. Dieser ist zum einen leicht zu verarbeiten, weist eine hohe Viskosität und schnelle Aushärtezeit auf. Zudem ist der Kleber auch für Applikationen über Kopf geeignet.

5.2 Applikation

Im Zuge der Versuchsbalkentests hat sich herausgestellt, dass eine Nut für eine zuverlässige Übertragung der Dehnungen nicht erforderlich ist. Durch die Nut stellte sich sogar das Problem dar, dass die Dehnungsübertragung zwischen Versuchsbalken und Sensorfaser nicht zuverlässig möglich war, da eine vollständige Ausfüllung und damit Verbund der Sensorfaser mit der Oberfläche nicht gewährleistet werden konnte.

Da die Versuchsbalken neu angefertigt wurden und dementsprechend keinerlei Beschädigungen, Grate oder ähnliche Unebenheiten aufwiesen, beschränkten sich die Vorbereitungen der Oberfläche in diesem Fall auf das Absaugen und das Anzeichnen des Faserverlaufs. Die Oberfläche der Tunnelinnenschale wird dagegen mehr Vorbereitungen erfordern. Zum einen sollte die Oberfläche vorab geschliffen werden, sodass starke Verschmutzungen, Unebenheiten und Grate, an welchen die Faser abscheren könnte, entfernt werden. Bei starken Unebenheiten und großen Rissöffnungen ist es gegebenenfalls notwendig diese vor der Applikation der Faser mit dem Kleber zu verspachteln. Um nicht die gesamte Oberfläche der Tunnelinnenschale schleifen und verspachteln zu müssen, sollte der Faserverlauf bereits vorab angezeichnet werden und nur die entsprechenden Bereiche vorbereitet werden. Unmittelbar vor der Applikation der Faser sollte die Oberfläche noch abgesaugt

werden, sodass ein optimaler Verbund zwischen Kleber und Tunnelinnenschale erreicht werden kann.

Bei der Applikation sollte zudem beachtet werden, dass diese möglichst im Sommer, wenn die Risse weitest möglich geschlossen sind, stattfindet. Dadurch wird vermieden, dass die Sensorfaser eine zu starke Stauchung erfährt und dadurch Gefahr läuft zu brechen.

Die Faserführung sollte so gewählt werden, dass eine regelmäßige Abdeckung der Tunnelinnenschale in Längsrichtung mit einem Abstand von ca. 1 m – 2 m gegeben ist. Dadurch wird gewährleistet, dass die Risse in annähernd 90° gekreuzt werden. Zu Zwecken der Temperaturkompensation ist des Weiteren erforderlich, dass eine Faser lose geführt wird. Jegliche Faserführung sollte dabei eine Länge von 70 m (inkl. Zuleitung) nicht überschreiten. Daher werden zur gesamten Abdeckung eines Blockes mehrere Faserschleifen notwendig sein.

Zum Schutz der Stecker, die an das Messinstrument angeschlossen werden, gegen Schmutz und Beschädigungen sollten diese in einer kleinen Metallbox (250x160x92mm), die an der Tunnelwand befestigt wird, zusammengeführt werden. Die Stecker können alternativ auch mit einer robusten Zuleitung verbunden werden, die in einen Bereich geführt werden, in dem das Messinstrument für eine eventuelle Dauermessung sicher platziert werden kann.

5.3 Datenerfassung

Für eine zuverlässige und hochauflösende Datenerfassung wird das auf der Rayleigh-Rückstreuung basierende Luna OBR empfohlen. Dies ermöglicht die Erfassung von Dehnungsänderungen mit einer Auflösung von 1 μm und Temperaturänderungen mit einer Auflösung von 0.1 K. Eine räumliche Auflösung von ≤ 10 mm ist möglich. Da es sich um ein relatives Messverfahren handelt, ist unmittelbar nach Applikation der Sensorfasern eine Nullmessung erforderlich, die für alle folgenden Messungen die Referenz für die Bestimmung der Dehnungsänderungen darstellt.

Für den Fall, dass mehrere Faserschleifen appliziert werden, besteht einerseits die Möglichkeit diese einzeln an das Messinstrument anzuschließen, andererseits können diese mit Hilfe eines optischen Schalters auch sequentiell gemessen werden.

Da die Messungen basierend auf der Rayleigh-Rückstreuung einseitig möglich sind, bietet dies den Vorteil, dass bei einer beidseitigen Messung im Falle eines Faserrisses die Deh-

nungen bis zum Riss erfasst werden können. Bei der Faserführung sollte daher, wenn möglich die Faserführung immer in Schleifenform erfolgen und beide Enden zum Messinstrument zurückgeführt werden.

Hinsichtlich des Messintervalls wird zum einen eine Dauermessung über mehrere Wochen empfohlen, sodass Tagesgänge und eventuell durch Temperaturschwankungen bedingte Rissweitenänderungen erfasst werden können. Um möglichst große Temperaturänderungen zu haben, wären für die Dauermessung die Übergangszeit zwischen Winter und Frühling oder Herbst und Winter sinnvoll. Zum anderen sollten zur Erfassung eines gesamten Jahreszyklus in regelmäßigen zeitlichen Abständen epochale Messungen durchgeführt werden.

Für eine Dauermessung ist es auf jeden Fall erforderlich, dass das Messinstrument in einem Schrank an einem geschützten Ort platziert werden kann. Die Messung der einzelnen Faserschleife würde in diesem Fall sequentiell mittels eines optischen Schalters erfolgen.

5.4 Datenauswertung

Die Auswertung der Daten bedarf in jedem Fall einiges an Erfahrung und Knowhow. In einem ersten Schritt ist die Umrechnung des gemessenen Rückstreuungsspektrums in Dehnungsänderungen erforderlich, für welche die für den entsprechenden Sensorfasertyp und die auftretenden Dehnungen spezifischen Umrechnungsparameter bestimmt werden müssen. In weiterer Folge ist eine Temperaturkompensation, welche ebenfalls für jede Anwendung neu konfiguriert werden muss, durchzuführen. Anschließend ist eine automatische Peakdetektion nötig, die alle Peaks basierend auf einen festgelegten Grenzwert detektiert. Für die genaue Verortung der Peaks in Bezug auf die Risse an der Tunnelinnenschale ist nach der Applikation eine tachymetrische Aufnahme und eine Verortung der Sensorfasern unabdingbar.

Der gesamte Workflow für ein Rissmonitoringsystem wird nochmals zusammenfassend in der nachfolgenden Abbildung 56 grafisch dargestellt.

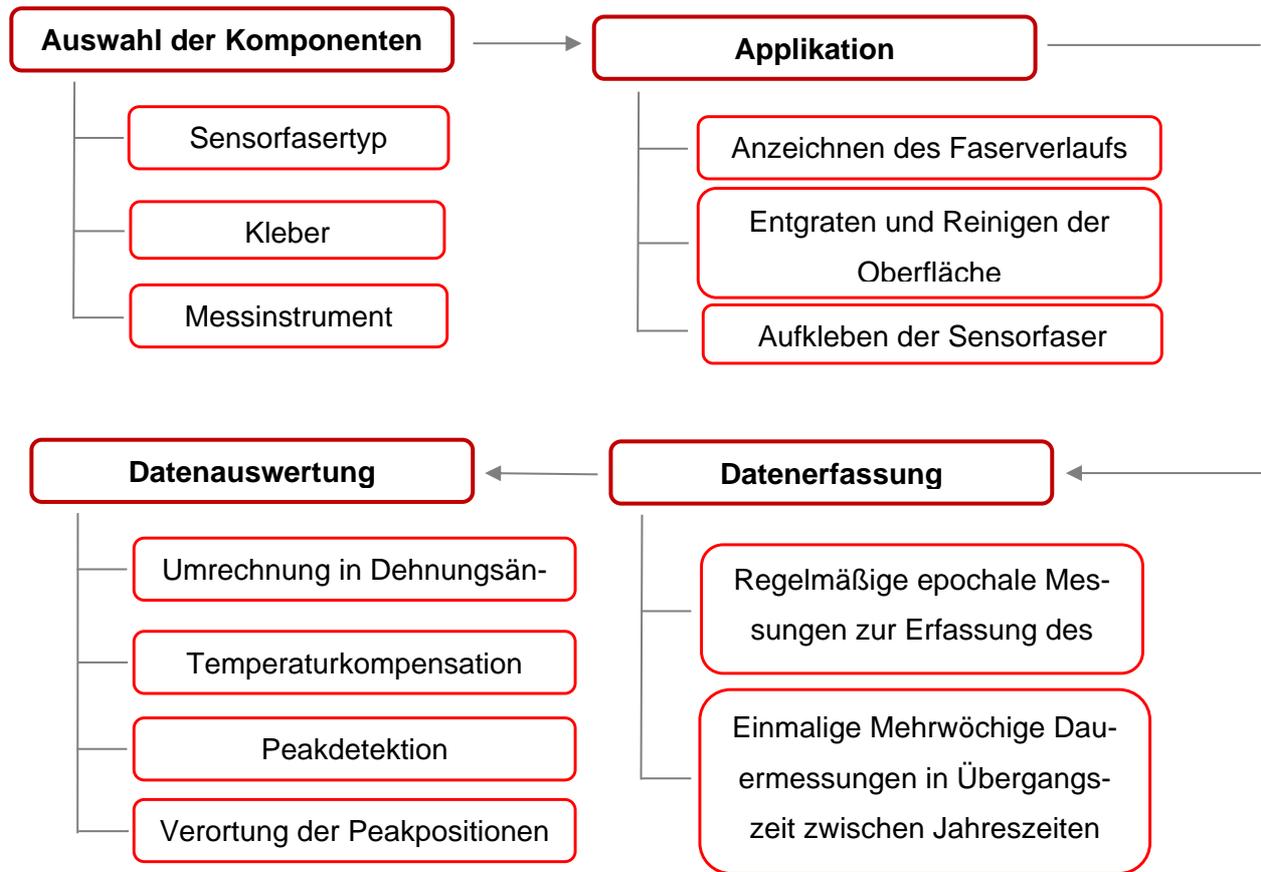


Abbildung 56: Workflow eines Rissmonitoringsystems

6 ZUSAMMENFASSUNG

Für das Rissmonitoring an Tunnelinnenschalen stehen zahlreiche Verfahren zur Verfügung. Zum Schutz der Tunnelinnenschale werden heutzutage vielfach Brandschutzplatten montiert, hinter welchen ein Rissmonitoring erforderlich ist. Der Einsatz der meisten Monitoringssysteme ist in diesem Fall nicht mehr möglich, da diese entweder freie Sicht zur Tunnelinnenschale benötigen, einen hohen manuellen Aufwand bedürfen oder nur punktuell Risse erfassen, wodurch eine automatische Detektion neuer Risse oder die Erfassung eines Rissbildes nicht möglich ist. Verteilte faseroptische Messsysteme haben sich in diesem Zusammenhang als geeignet herausgestellt. Das verteilte faseroptische Messsystem kann aufgrund seiner geringen Abmessungen hinter den Brandschutzplatten appliziert werden, ermöglicht eine automatische Detektion von neuen Rissen, eine kontinuierliche Erfassung der Rissbreitenänderungen sowie die Erfassung eines Rissbildes.

Im Zuge der Untersuchungen im Labor und an drei realen Versuchsbalken unter Belastung konnten ein zuverlässiges Rissmonitoringsystem für eine spätere Applikation im Tunnel gefunden werden.

Hinsichtlich der hohen Messauflösung und räumlichen Auflösung hat sich das auf der Rayleigh-Rückstreuung basierende Luna OBR als geeintes Messinstrument für die Erfassung von Rissen herausgestellt.

Als Sensorfaser stellte sich der Typ Tight Buffered (TB), welche eine hohe Sensitivität und ausreichenden Schutz hat, als geeignet heraus. Für die Applikation hat sich der Ankerkleber als geeignet herausgestellt. Dieser weist eine hohe Viskosität, schnelle Aushärtezeit und eine Eignung für die Applikation über Kopf aus, wodurch dieser Kleber einfach zu verarbeiten ist. Zudem hat sich im Rahmen der Laboruntersuchungen gezeigt, dass dieser Kleber einen sehr guten Verbund zwischen Faser, Beton und Kleber aufweist und damit auch eine gute Übertragung der Dehnungen auf den Faserkern gegeben ist. Die Applikation der Messfasern ist direkt auf die Oberfläche möglich. Eine Nut birgt sogar das Problem, dass ein vollständiges Verfüllen dieser mit Kleber nicht gewährleistet werden kann und damit die Faser keinen Verbund zum Objekt aufweist. Hinsichtlich der Implementierung in einem realen Tunnel sind angesichts der im Verhältnis zu den Versuchsbalken rauen und verschmutzten Oberfläche als vorbereitende Maßnahmen noch ein Entgraten und Reinigen der Oberfläche vorzusehen. Um hier unnötige Arbeit zu ersparen, sollte der Faserverlauf vorab markiert werden, sodass nur in diesen Bereichen die Tunnelinnenschale vorbereitet wird.

Die Belastungsversuche an den Versuchsbalken haben zudem gezeigt, dass die Entstehung des Erstrisses zwar nicht vorhergesagt werden kann, jedoch die Öffnung eines neuen

Risses unmittelbar im Signal in Form eines eindeutigen Peaks ersichtlich ist. Im Zuge der Be- und Entlastungszyklen und der beschleunigten Alterungssimulation hat sich eine optimale Reproduzierbarkeit der Dehnungsmessungen gezeigt. Eine Alterungserscheinung von Sensorfaser oder Kleber sowie der Verlust des Verbundes zwischen Kleber, Faser und Oberfläche war damit nicht erkennbar. Die Nachapplikation von zwei Messfasern nach der Rissbildung bei einer Rissöffnung von 0.8 mm, dass mit geringer Einschränkung auch das Rissatmen (Öffnen und Schließen) bereits bestehender Risse erfasst werden kann.

Die Dehngrenze der Messfasern konnte im Zuge der Versuche, trotz einer Rissöffnung von mehr als 2.6 mm nicht erreicht werden. Die Limitierung stellte die Entlastung von der maximalen Rissöffnung von über 2.6 mm auf 0.8 mm dar. Dabei kam es während der Entlastung aufgrund der starken Stauchung zum Bruch der Faser. Für die Applikation im Tunnel wird daher für die Applikation ein Zeitraum, in dem die Risse weitestgehend geschlossen sind, wie dies im Sommer der Fall ist, empfohlen.

Die Applikation und der Betrieb des hier gefunden Rissmonitoringsystem unter realen Bedingungen wird in AP 5 - Implementierung im Detail erläutert.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] AMBERG TECHNOLOGIES AG: TMS Tunnelscan. Complete tunnel information at a glance. Regensdorf, Schweiz, 2007
- [2] DÖRING, H.; HABEL, W.; LIENHART, W.; SCHWARZ, W.: Faseroptische Messverfahren, Handbuch der Geodäsie, Band Ingenieurgeodäsie: 48 p, doi:10.1007/978-3-662-46900-2_22-1, 2016
- [3] GEHWOLF, P.; MONSBERGER, C.; BARWART, S.; WENIGHOFER, R.; GALLER, R.; LIENHART, W.; HABERLER-WEBER, M., MORITZ, B.; BARWART, C.; LANGE, A.: Deformation measurements of tunnel segments at a newly developed test rig, Geomechanics and tunnelling (Geomechanik und Tunnelbau) 9, 3: 180 – 187, 2016
- [4] HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GmbH: Data Sheet: OptiMet-PKF. Darmstadt, Deutschland
- [5] KREGER, S.T.; GIFFORD, D.K.; FROGGATT, M.E.; SOLLER, B.J.; WOLFE, M.S.: High resolution distributed strain or temperature measurements in single-and multi-mode fiber using swept-wavelength interferometry. Optical Fiber Sensors, Optical Society of America, Washington DC, USA, ThE42 - 4 S, 2006
- [6] LANGE, J.; BENNING, W.: Verfahren zur Rissanalyse bei Betonbauteilen. Fachtagung Bauwerksdiagnose, Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, Berlin (2006), DGZfP-Berichtsband 100-CD, Poster 13, 2006
- [1] LUNA (2014a), Data Sheet: Optical Backscatter Reflectometer (Model OBR 4600). Ver. LTOBR4600 REV. 004 02/13/2014, Luna Technologies Inc., Roanoke, USA, 2014
- [2] MAAS, H.-G.: Digitale Nahbereichsphotogrammetrie im bautechnischen Versuchswesen. Bautechnik 89 (2012), Heft 11 (S. 786-793). Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2012.
- [3] MONSBERGER, C.; LIENHART, W.: In-situ Deformation Monitoring of Tunnel Segments using High-resolution Distributed Fibre Optic Sensing. Proc. 8th Int. Conf. on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure – SHMII-8, Brisbane, Australien: RS1-9, 12 p, 2017
- [4] MONSBERGER, C.; WOSCHITZ, H.; LIENHART, W.; RAČANSKÝ, V., GÄCHTER, D., KULMER, R.: Überwachung von Ankerausziehversuchen im Rahmen der Hangsicherung für den Neubau einer Raffinerie, Proc. 32nd Christian Veder Kolloquium 'Zugelemente in der Geotechnik', TU Graz, Gruppe Geotechnik 58: 173-192, 2017

- [5] NEUBREX CO., Ltd. Kobe, Data Sheet: FutureNeuro™ FN-SILL-3, Embossed Sensing Cable. Hyogo, Japan, 2016
- [6] ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK: Geotechnical Monitoring in Coventional Tunneling, Handbook. Salzburg, Österreich, 2014
- [7] PENGG KABEL GmbH: Glasfaserkabel. Konfektionierbare Kabel I-V (S. 64). Österreich, 2017
- [8] PRESL, R.: Entwicklung eines automatisierten Messsystems zur Charakterisierung faseroptischer Dehnungssensoren, Masterarbeit, FH Oberösterreich, Wels, Österreich, 2009
- [9] SOLLER, B.J.; WOLFE, M.S.; FROGGATT, M.E.: Polarization resolved measurement of Rayleigh backscatter in fiber-optic components. OFC Technical Digest, Los Angeles, USA, 2005
- [10] WOSCHITZ, H.; KLUG, F.; LIENHART, W.: Design and calibration of a fiber optic monitoring system for the determination of segment joint movements inside a hydro power dam. IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 33, Issue 12, S. 2652-2657, 2015