

Rissmonitoring und Bewertungs- modell von unbewehrten Tunnelinnenschalen RIBET

Deliverable D 5 Implementierung

(VIF2017)

AutorInnen:

DI Madeleine WINKLER

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

DI Maciej KWAPISZ

DI Dr. Alois VORWAGNER

DI Dr. Dominik PRAMMER

DI Urs GRUNICKE

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

UHG Consult Ziviltechniker

Technische Universität Graz- Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	4
1 Validierung im Zuge Realer Test im Tunnel	6
1.1 Allgemeines	6
1.1.1 Planung des Messlayouts	6
1.1.2 Vorbereitende Arbeiten vor Ort	8
1.2 Installation	9
1.2.1 Faseroptische Messfasern	10
1.2.2 Konventionelle Sensoren zur Referenzmessung	12
1.3 Epochenweise Messungen	15
1.3.1 Verteilte Faseroptische Messungen (DFOS)	15
1.3.2 Konventionelle Messungen	22
1.3.3 Rissbreitenbestimmung aus DFOS	26
1.4 Dauermessung	32
1.4.1 Faseroptische Messungen	32
1.4.2 Konventionelle Messungen der Dauermessung	38
1.4.3 Schwingung der Zwischendecke	38
1.4.4 Rissweitenbestimmung aus DFOS	44
2 Hinweise und Empfehlungen zur Implementierung des DFOS-Monitorings hinter Verkleidungen	45
2.1 Einleitung	45
2.2 Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Rissüberwachung	45
2.3 Installation der Messeinrichtungen	49
2.4 Messdurchführung und -auswertung	52
2.5 Empfohlenes Vorgehen bei Implementierung des DFOS-Monitorings	55

3	Zusammenfassung und Ausblick.....	56
3.1	Schlussfolgerungen.....	56
3.2	Ausblick und Entwicklungsbedarf.....	57
	Literaturverzeichnis.....	59

Version 0.2

Versionshistorie

Version	Änderung	Bearbeiter
0.1	Erstentwurf 27.10.2020	IGMS, AIT, UHG
0.2	Finale Fassung	IGMS, AIT, UHG

Einleitung

In Österreich besteht eine lange Tradition schlanker unbewehrter Tunnelinnenschalen. Gegenüber konventionellen Betonbauten liegen im Tunnelbau besondere Verhältnisse vor, wie z.B. kontinuierliche Bettung, enge Betoniertakte und sehr kurze Ausschallfristen, einhäuptige Gewölbeschalungen, Einsatz von Außenrüttlern, Zwang zwischen Widerlager und Gewölbe sowie zwischen Innenschale und Abdichtungssystem bzw. Außenschale u.dgl. mehr.

Bautechnisch entspricht der Einsatz der unbewehrten Innenschale dem heutigen Stand der Technik und wird planerisch, bautechnisch und betontechnologisch beherrscht. Die tunnel-spezifischen Erfahrungen fanden u.a. in der ÖBV-Richtlinie Innenschalenbeton [1] oder in den DAUB-Empfehlungen „Unbewehrte Innenschalen“ [4] Eingang. Auch die Methoden der Berechnung und Bemessung unbewehrter Innenschalen ist nach heutigem Stand der Technik ausreichend entwickelt [2][3].

Die Bauwerksüberwachung hat zum Ziel, den Zustand des Tragwerkes hinsichtlich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit zu beurteilen. Über die Lebensdauer eines Tunnels ändern sich einerseits Einwirkungen, andererseits unterliegen die Bauwerkeigenschaften und -widerstände einer alterungsbedingten Veränderung, womit der Auslastungsgrad zeitabhängig wird.

Risse in Betonbauten sind oft wesentliche Indikatoren für viele sich ändernde Beanspruchungssituationen. Risse ab einer gewissen Größe sowie die Änderung des Rissbildes werden deshalb heute im Zuge der Bauwerksüberwachungen im Anwendungsbereich der RVS 13.03.31 bzw. des ÖBB-Regelwerks 06.01.02 erfasst und dokumentiert. Sie dienen dem fachkundigen prüfenden Ingenieur als Grundlage für eine objektspezifische Beurteilung der Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Innenschale. Der beurteilende Ingenieur versucht dabei, aus dem angetroffenen Bauwerkszustand auf frühere oder aktuelle Beanspruchungen zu schließen. Abgesehen von den Grenzwerten der Erfassungsgrenze und einem allfälligen Vergleich mit den Bemessungskriterien der seinerzeitigen Planung, bestehen dazu allerdings derzeit noch im Regelfall keine allgemeinen systematisierten Beurteilungskriterien.

Der Stellenwert des Rissbildes im Rahmen der Bauwerksüberwachung steht im Konflikt mit Maßnahmen, welche die Einsehbarkeit der Tunnelleibung einschränken. Neben Lärmschutzpaneelen ist dies bei den in den letzten Jahren vermehrt eingesetzten Brandschutzverkleidung der Fall, welche zur Erfüllung des baulichen Brandschutzes gem. RVS 09.01.45 eingesetzt werden.

Vor allem bei Verkleidungen mit Brandschutzplatten (welche häufiger aufgrund der raschen Umsetzbarkeit und der daher geringen Verkehrsbeeinträchtigung gegenüber Schutzschichten, im Spritzauftrag im monolithischen Verbund angewendet werden) kann die weitere Rissentwicklung des Bestandstragwerks visuell nicht oder nur sehr eingeschränkt beobachtet werden. Derzeit wird versucht, diesem Defizit durch die Vorgabe von de- und wiedermontierbaren Brandschutzplatten oder durch das Freilassen radialer Sichtschlitze zu begegnen. Dazu liegen jedoch zum einen noch keine Langzeiterfahrungen vor, zum anderen verbleibt die Leibung weiterhin räumlich und/oder zeitlich größtenteils verborgen.

Im Rahmen von RIBET werden daher die technischen Möglichkeiten eines Rissmonitorings hinter Brandschutzplatten untersucht. Für die Konzeptionierung des Monitorings ist zu definieren, welche potenziellen Rissbilder im Rahmen der Bauwerksüberwachung von Interesse sind und daher erfasst werden sollten.

Der gegenständliche Bericht fasst die Ergebnisse aus dem Arbeitspaket 5 Implementierung der entwickelten Methode zusammen:

- Validierung des Monitoring-Systems hinter Verkleidungen
- Erfassen realer Einbau- und Messbedingungen
- Empfehlungen über Auswahl und Einsatz des Monitoring-Systems

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Laborversuche im AP 3 (Deliverable D 3) wurden Modelle und Rissweitenbestimmungsmethoden grundlegende Auswertelgorithmen im AP 4 (Deliverable D 4) genauer untersucht und erläutert. Im Zuge des Projekts wurden, das entwickelte System in einer realen Einsatzumgebung getestet (AP 5). Dazu wurde eine Messtelle zur Validierung im Tauerntunnel an der A10 Tauernautobahn (Richtungsfahrbahn Villach) für einen Zeitraum von mehr als einem Jahr überwacht. Die Auswertungen und Ergebnisse dieser Messungen sowie Empfehlungen zu Einsatz und Auswahl des Monitoring-Systems sind im Rahmen dieses Berichts zusammengefasst.

1 VALIDIERUNG IM ZUGE REALER TEST IM TUNNEL

Der Ansatz von RIBET beruht auf der Messmethode der verteilten optischen Fasermessung (Distributed Fibre Optic Sensing, kurz DFOS), mit der über sehr lange Strecken (bis zu 70m) durchgehend Dehnungen und Risse im Bauwerk durch Applikation eines Sensorkabels (Faser) erfasst werden können. Das im Zuge des Projekts entwickelte Messsystem wurde zur Validierung des Messsystems in realer Testumgebung im Tunnel implementiert. In Abstimmung mit allen Beteiligten wurde als Testobjekt der Tauernstraßentunnel an der A 10 Tauern Autobahn ausgewählt. Die Messstelle befindet sich im Zuluftkanal bei Tunnelmeter 1848 ausgehend vom Nordportal, der Tunnelröhre in der Richtungsfahrbahn Villach. Dazu wurden die faseroptischen Messungen durch das Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der TU Graz (IGMS) zum einen durch epochenweise Messungen in regelmäßigen zeitlichen Abständen zur Erfassung eines Jahreszyklus sowie durch eine mehrwöchige Dauermessung durchgeführt. Als Referenzmessungen wurden von Seiten des Austrian Institute of Technologie (AIT) während der gesamten Messdauer Temperaturmessungen der Luft und des Betons sowie Messungen der Rissbreitenänderungen an repräsentativen Punkten mittels optischer Wegaufnehmer und Schwingsaitensensoren durchgeführt und anschließend gegenübergestellt.

Durch diese Messreihen in realer Testumgebung im Tunnel soll vor allem das im Rahmen der Laborversuche (D 3) untersuchte Rissmonitoringsystem unter realen Bedingungen und Belastung im Zuge der Überwachung eines Jahreszyklus verifiziert werden.

1.1 Allgemeines

1.1.1 Planung des Messlayouts

Im Zuge einer ersten Begehung wurde der Bereich, in welchem die Messfasern appliziert werden sollten, festgelegt. Die Festlegung des Bereichs war zudem vorab erforderlich, da in dem unmittelbaren Bereich Vorinstallationen (Prismen, Stromversorgung etc.) notwendig waren, um die applizierten Messfasern und Risse später tachymetrisch im Tunnelnetz einmessen und verorten zu können, sowie das Referenzmesssystem installieren zu können. Während einer zweiten Begehung wurde ein geeigneter Bereich mit entsprechenden Rissen eingegrenzt sowie mögliche Layouts der Sensorfaser festgelegt. Die geplante Faserführung am Block 142 und 143 wurde mittels eines Markiersprays markiert (siehe Abbildung 1) und anschließend tachymetrisch eingemessen.

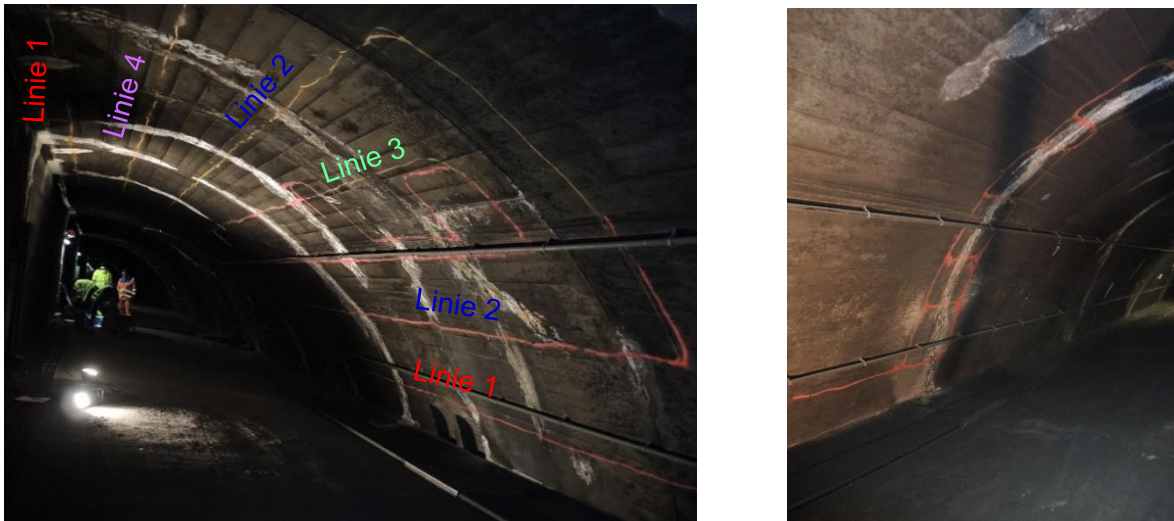


Abbildung 1: Geplanter Faserverlauf entlang der Tunnelinnenschale markiert mit Markierspray und 4 Messlinien

In Abbildung 2 ist das geplante Messlayout auf Basis eines Scans der Tunnelinnenschale dargestellt.

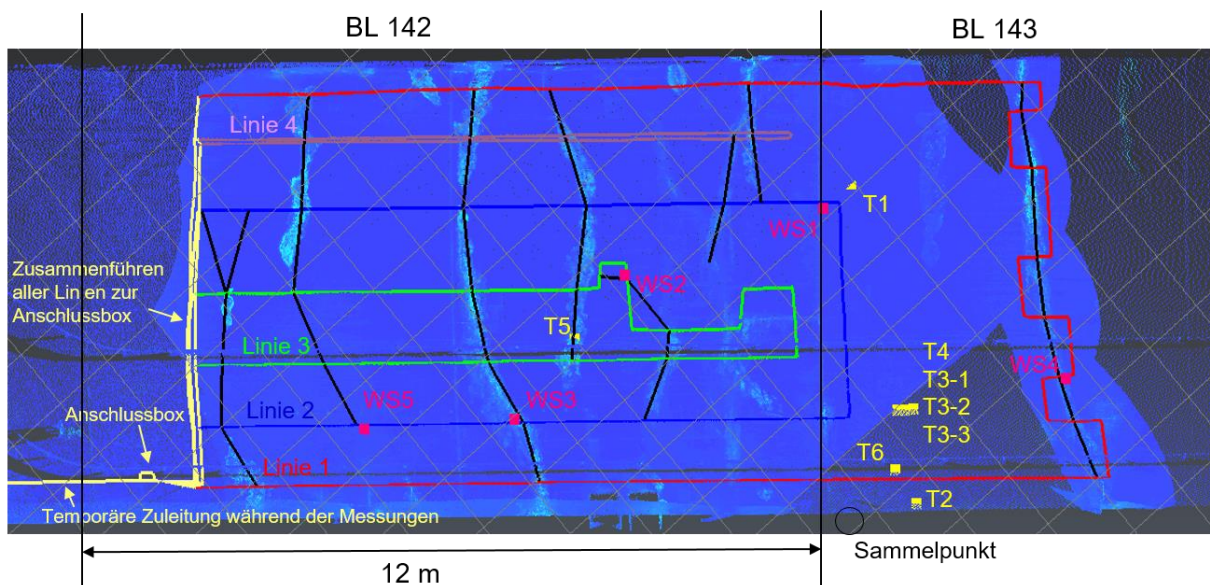


Abbildung 2: Fixierte Faserführung der Faserlinien und Positionen der Schwingsaiten (WS) - und Temperatursensoren (T)

Aufgrund der maximalen Reichweite von 70 m Faserlänge des eingesetzten Messgerätes und um möglichst den gesamten Bereich abzudecken, wurden 4 Messlinien (Linie 1- Linie 4) mit jeweils einer Messfasern festgelegt. Die Faserführung wurde zudem in Schleifenform gewählt, sodass zum einen eine regelmäßige Abdeckung der Tunnelinnenschale in radialer

Richtung gegeben ist und zum anderen im Falle eines Bruchs der Faser trotzdem von beiden Seiten Messungen bis zur Position des Bruchs durchgeführt werden können. Die oben dargestellte rote Linie 1 wurde dabei auf dem Hinweg in einer Höhe von ca. 50 cm über dem Boden bis zu einem abgelegenen Riss, welcher anschließend mäanderförmig mehrmals überkreuzt wurde, und auf dem Rückweg am First wieder zurückgeführt. Die blaue Linie 2 verläuft etwa 1 m innerhalb der roten Linie 1 und wurde entlang eines Stückes radial verlegt. Mit der grünen Linie 3 wurden zwei radial auftretende Risse mehrfach überkreuzt. Die violette Linie 4 wurde ebenfalls in einem Abstand von ca. 1 m zur roten Linie 1 und blauen Linie 3 geplant, sodass die Innenschale im Abstand von 1 m mit Sensorfasern abgetastet wird. Die Rückschleife von Linie 4 wurde unmittelbar neben der Hinschleife als lose Faser (nicht befestigt) zum Zwecke der Temperaturkompensation zurückgeführt. Neben den Rissen wurde mit der roten (Linie 1) und blauen (Linie 3) auch die Blockfuge zwischen Block 142 und 143 jeweils zweimal pro Linie überkreuzt.

1.1.2 Vorbereitende Arbeiten vor Ort

Bei Betrachtung der Oberfläche der Tunnelinnenschale im Zuge der ersten Begehung zeigte sich, dass die Oberfläche neben den Rissen und Blockfugen, deren Bewegung erfasst werden soll, auch Versinterungen sowie Abplatzung am Beton und Betoniergrate durch die Schalung aufweist (siehe Abbildung 3). Des Weiteren ist die Oberfläche stark verunreinigt.



Abbildung 3: Unebenheiten an der Tunnelinnenschale aufgrund von Versinterungen an den Rissen oder durch Betoniergrate

Für die Installation der faseroptischen Sensoren auf einer Oberfläche ist es jedoch wichtig, dass die Oberfläche möglichst glatt ist und keine Grate aufweist, an welchen die Faser abscheren könnte. Zudem muss die Oberfläche frei von Staub und Ruß sein, um eine optimale Haftung des Klebers zu gewährleisten. Dazu wurde die Oberfläche entlang des markierten Faserverlaufs (mit einer Breite von ca. 30 cm) von der ASFINAG abgeschliffen



Abbildung 4).



Abbildung 4: Abgeschliffene Oberfläche entlang des markierten Faserverlaufs (links) und Arbeiten auf dem Rollgerüst (rechts)

Die Referenzsensoren sind im Kapitel 1.2.2 beschrieben. Für die Applikation der Referenzmesssensoren (optische Wegaufnehmer, Seilzugwegaufnehmer und Temperatursensoren) waren keinerlei vorbereitende Maßnahmen notwendig.

1.2 Installation

Im Nachfolgenden wird die Installation der faseroptischen und konventionellen Sensoren sowie die Betriebsnahme der Messanlage im Detail beschrieben.

1.2.1 Faseroptische Messfasern

Die Installation des faseroptischen Messsystems fand vom 24.06.2019 bis zum 28.06.2019 statt. Die Messfasern wurden mit jenem Ankerkleber, der sich im Zuge der Laboruntersuchungen (AP 3 – Riss-Monitoring, D 3) als am geeignetsten erwiesen hatte, auf die Tunnelinnenschale appliziert.



Abbildung 5: Aufkleben der faseroptischen Sensoren

Das Aufkleben der Sensorfasern erfolgte dabei immer abschnittsweise. Vor dem Aufkleben wurde die Oberfläche abgesaugt und die Faser mittels Malerklebeband an ein paar Punkten in leicht gespanntem Zustand temporär fixiert. Anschließend wurde die Faser zwischen den Klebebändern mit dem Ankerkleber verklebt und gewartet, bis der Kleber leicht ausgehärtet war (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Abschnittsweise Verkleben des faseroptischen Sensors

In der Zwischenzeit wurde der nächste Abschnitt vorbereitet und die Faser verklebt. Nachdem der nächste Abschnitt zwischen den Klebebändern verklebt war, wurden die Klebe-

bänder im vorigen Abschnitt entfernt und mit Kleber aufgefüllt. Stellen mit großen Unebenheiten oder Öffnungen im Beton (siehe Abbildung 7) wurden zuvor mit dem Ankerkleber verspachtelt und die Faser anschließend darüber verklebt.



Abbildung 7: Verspachteln von groben Unebenheiten und anschließendes Verkleben der Faser

Die Enden der Messfasern wurden zum Schutz in einer kleinen Metallbox (250x160x92mm³), welche an der Tunnelwand befestigt wurde, verstaut (siehe Abbildung 8), wo sie anschließend bei der Messung an das Messinstrument angeschlossen werden konnten.

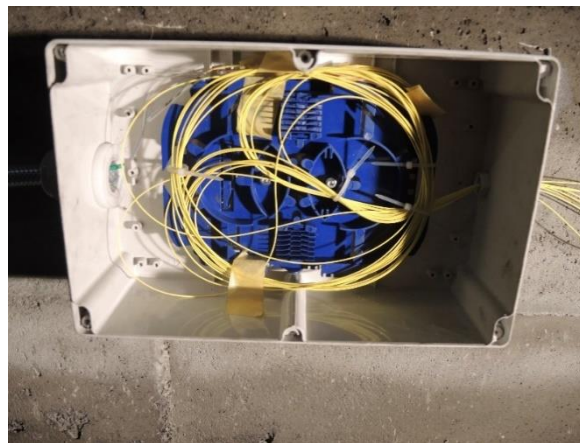


Abbildung 8: Verstauen der Enden in einer Metallbox

Für die Verortung wurde auf jeder der Fasern an jenem Punkt, an welchem die Faser die Metallbox verlässt, ein punktueller Druck ausgeübt und während der Druckausübung die Dehnung gemessen. Diese punktuell ausgeübte Dehnung ist im Signal durch einen Peak deutlich ersichtlich und der Fasermeter wird damit räumlich zuordenbar. Des Weiteren wurde der gesamte Faserverlauf mit der Totalstation TS15, die über die vier gesetzten Fest-

punkte stationiert wurde, sowie die Kreuzungspunkte mit Rissen tachymetrisch eingemessen. Damit können spätere, in den Daten auftauchende Dehnungsspitzen (Strainpeaks) räumlich zugeordnet und entsprechend (z.B. als vorhandene Rissbewegungen, Blockfugen aber auch neue Ereignisse) interpretiert werden.

Das Messinstrument wurde für den Zeitraum der Messungen in einem Messschrank verstaut, welcher an einem sicheren Ort platziert wurde. Die Verbindung zwischen Messinstrument und Messfasern wurde über eine temporäre Zuleitung realisiert.



Abbildung 9: Platzierung des Messinstrumentes und des optischen Switches in einem gesicherten Messschrank

1.2.2 Konventionelle Sensoren zur Referenzmessung

Hintergrund der Messung mit konventionellen Sensoren ist die Verifikation der Messergebnisse der Fasermessung, welche zu bestimmten Zeitpunkten erfolgt. Darüber hinaus ist mit dem gewählten Messaufbau eine Dauermessung über den gesamten Beobachtungszeitraum möglich.

Zur Verifikation der faseroptischen Messungen wurde daher versucht, Rissbewegungen an fünf signifikanten Stellen dauerhaft zu überwachen, welche mit verschiedenen konventionellen Wegsensoren nahe an einer Messfaser positioniert wurden. Es wurde versucht, die Sensoren an verschiedenen Stellen im Faserverlauf wie auch an unterschiedlichen Risstypen zu positionieren. Neben der Wegmessung wurde auch noch eine Temperaturmessung durchgeführt und während des ganzen Messzeitraums aufgezeichnet.

Sämtliche Messdaten wurden auf einem Messcomputer im Tunnel zwischengespeichert und in 15 Minuten Intervallen an einen Server des AIT mittels mobilen Internets gesendet.

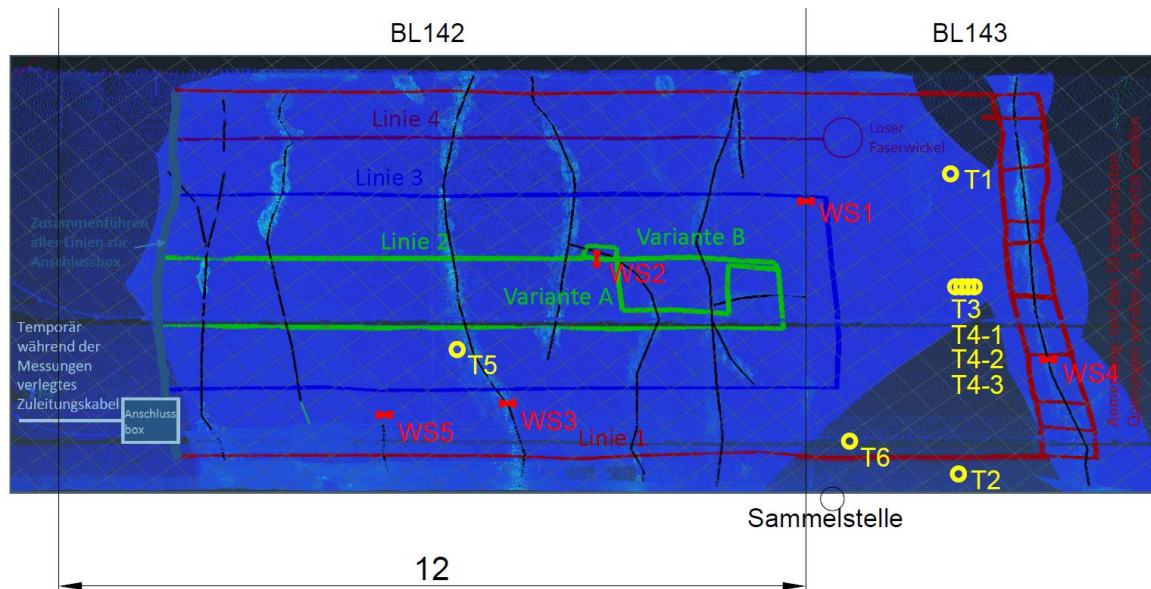


Abbildung 10: Positionierung der konventionellen Messsensorik zur Dauermessung. Wegaufnehmer (WS) sind rot und Temperatursensoren (T) sind gelb dargestellt. Die mehrfarbigen Linien (rot, violett, blau und grün) stellen den Verlauf der optischen Faser dar.

Der Sensor WS1 (Abbildung 10) misst die Bewegung der Blockfuge. Die Sensoren WS3-WS5 wurden an Radialrissen positioniert, wobei es sich beim Riss an der Stelle WS5 um einen großen nicht sinternden möglicherweise noch jungen Riss handelt. An Position WS2 wird ein sich im Verlauf stark krümmender, fast in einen Längsriss übergehender Radialriss gemessen.

Vor Beginn der Messung war schwer abzuschätzen, mit welchen Temperaturextrema an der Messstelle (ca. 1,8 km im Tunnelinneren) zu rechnen ist. Da diese aber Einfluss auf die Sensorwahl haben, kamen zwei Arten von Wegaufnehmern zum Einsatz. Optoelektronische Distanz-Sensoren (Baumer OADM 20I4440/S14C) haben zwar die Vorteile einer besseren Auflösung und auch eines klareren Temperaturverhaltens, allerdings decken diese Sensoren nur einen vergleichsweise kleinen Temperaturbereich ab und funktionieren bei negativen Temperaturen nicht (Temperaturbereich 0°C – 50°C). Das Messprinzip beruht auf Interferenzmessung eines optischen Laserstrahl (Laserdiode). Die optoelektronischen Sensoren können nur über einen Messbereich von 3-5 cm aufzeichnen. Dieser Sensor benötigt dazu, wie jedes optische Distanzmessgerät, einen Bezugspunkt. Da der Sensor auf der Oberfläche auf einer Rissflanke montiert ist, wurde zur Überbrückung der Messdistanz

als „Reflektor“ ein Vollprofil-Vierkantstab aus Stahl verwendet (siehe Abbildung 11 links oben) und die Relativbewegungen in Messstrahlrichtung aufgezeichnet.

Bei den anderen Sensoren handelt es sich um Seilzugwegaufnehmer SX50 der Firma WayCon. Diese haben den Nachteil, dass es bei Temperaturen $<10^{\circ}\text{C}$ immer wieder zu Unstetigkeiten (Sprüngen) in der Aufzeichnung kommt. Außerdem ist das Temperaturverhalten dieser Sensortypen nicht vollständig linear. Vorteil dieser Sensoren ist allerdings der größere Temperaturbereich von -20°C – 80°C . Dieser Sensor überbrückt die Messdistanz mit einem feinen Mess-Seil, welches über den Riss gespannt und an der anderen Rissflanke in einem Abstand von einigen Zentimetern befestigt wird. Die Relativbewegung in Seilrichtung wird aufgezeichnet.

Da also beide Sensortypen ihre Vor- und Nachteile haben, wurden an den Stellen WS2, WS3 und WS4 beide Sensortypen installiert, während an den Stellen WS1 und WS5 nur die Seilzugsensoren montiert wurden. Der Vergleich mit der Fasermessung ist damit auch in Gegenüberstellung beider Sensortypen möglich. Die Ausrichtung der Messrichtung erfolgte orthogonal zur Rissorientierung, parallelversetzt zur Messfaser.

Bei den Temperatursensoren wurde nicht nur verteilt im Tunnelquerschnitt angeordnet, sondern auch ein Temperaturprofil verteilt über die Bauteildicke (Temperaturgradient) gemessen, um somit Rückschlüsse auf die Bauteiltemperatur zu erhalten. Die Sensoren T1-T3 messen die Oberflächentemperatur an verschiedenen Höhen. An der Stelle T4 wurden die Sensoren in den Tiefen: T4-1 in 2 cm, T4-2 in 9 cm und T4-3 in 16 cm unter der Betonoberfläche installiert. Der Sensor T5 wurde an einer Feuchtstelle (sinternder Riss) positioniert und T6 misst die Lufttemperatur im Zuluftkanal.



Abbildung 11: Beispiel der Montage der optoelektronischen Distanzsensoren und der Seilzugsensoren (links) und der Temperaturmessung (rechts). Bei der Temperaturmessung ist die Profilmessung wie auch eine Oberflächenmessung zu sehen.

Unmittelbar nach der Sensorinstallation und Inbetriebnahme der Messung wurden noch, sofern möglich, die initialen Rissweiten an den Messstellen mit Rissbreitenlineal bestimmt. Wobei dies aufgrund von Versinterung der Risse teilweise nur bedingt möglich war.

Tabelle 1: Initiale Rissweiten an den Messstellen

Stelle	WS1	WS2	WS3	WS4	WS5
Initiale Rissweite	Blockfuge (nicht bestimmbar)	0,4 (trocken)	>1,6 (stark versintert)	0,8 (versintert)	1,6 (trocken)
Foto der Rissbreitenbestimmung					

1.3 Epochenweise Messungen

1.3.1 Verteilte Faseroptische Messungen (DFOS)

Die Messungen wurden als verteilte optische Fasermessung mit dem bereits im Zuge der Laborversuche verwendeten und auf der Rayleigh-Rückstreuung basierenden Messinstrument Luna OBR durchgeführt. Grund dafür ist, dass das Luna OBR zwar lediglich eine Reichweite von 70 m, jedoch eine räumliche Auflösung von zumindest 1 cm besitzt und Dehnungen im Bereich von 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ erfasst werden können. Damit ist eine Erfassung der Risse und Rissbreitenänderung möglich. Da es sich bei dem auf Rayleigh-Rückstreuung basierten Messsystem jedoch um ein relatives Messsystem handelt, wird die Dehnung immer in Referenz zu einer Nullmessung bestimmt.

Zur Messansteuerung bei mehreren Fasern wird ein sogenannter „optischer Switch“ zur Ansteuerung der jeweiligen Messfaser dazwischen geschaltet.

Daher ist es unbedingt erforderlich unmittelbar nach der Installation der faseroptischen Sensoren eine Nullmessung des Ursprungszustandes durchzuführen. In Hinblick auf die Dauermessung wurde die Nullmessung zum einen unter Verwendung des optischen Switches und zum anderen einzeln durch direktes Anstecken jeden Endes am Luna OBR durchgeführt. Um eine zuverlässige Nullmessung zu erhalten, erfolgte diese über einen Zeitraum von 20 Stunden vom 27.06.2019 bis 28.06.2019. Die weiteren Folgemessungen wurden an den nachfolgenden Tagen durchgeführt:

- Folgemessung am 24.09.2019
- Folgemessung am 11.12.2019
- Folgemessung am 03.02.2020
- Folgemessung am 16.04.2020
- Folgemessung am 12.08.2020

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse der epochenweisen Dehnungsmessungen grafisch dargestellt und im Detail erläutert.

Grundsätzlich konnten alle vorhandene Risse und deren Bewegungen durch die gemessenen Dehnungsprofile als Dehnungsspitzen (folgend als Strainpeaks bezeichnet) erkannt werden. Ein guter Zusammenhang zwischen Dehnungszunahmen und Jahreszeit ist erkennbar. Allen tachymetrisch eingemessenen Risspositionen entlang der einzelnen Messlinien konnte jedoch eindeutig ein Strainpeak zugeordnet werden. In Abbildung 12, sind diese dargestellt, und markiert. Bereits die Auswertung der ersten Folgemessung zeigte vor allem bei der roten Messlinie 1, dass mittels DFOS sogar mehr „Strainpeaks“ detektiert werden konnten als Risse an der Tunnelinnenschale augenscheinlich zu erkennen waren.

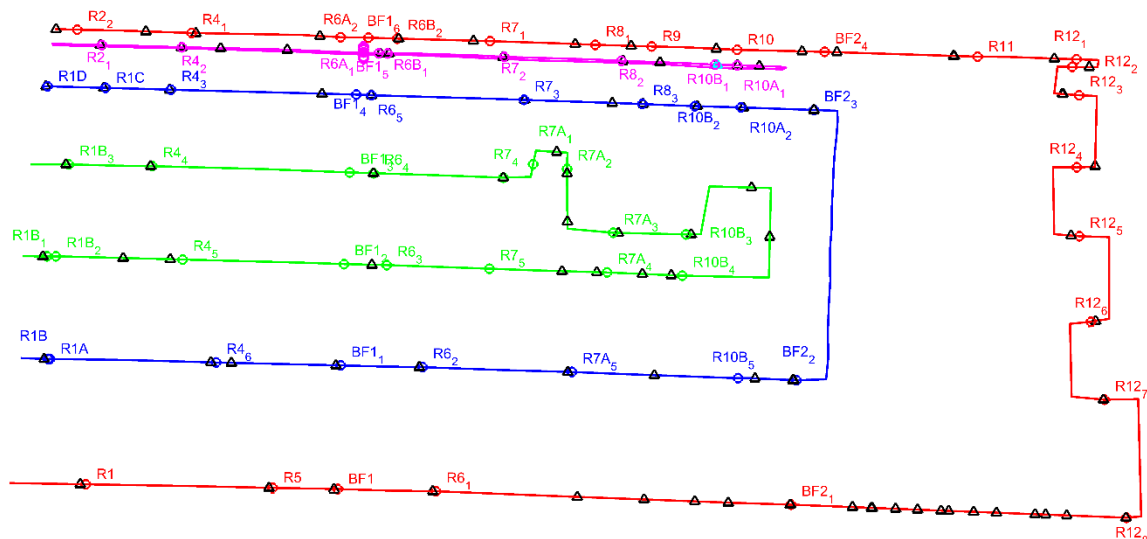


Abbildung 12: Verortung der Strainpeaks gegenüber der tachymetrisch eingemessenen Risspositionen entlang der einzelnen Messlinien

Ein Übereinanderlegen der gemessenen Dehnungsprofile aller Messepochen für die rote Messlinie 1 in Abbildung 13 zeigt nochmals im Detail, dass die einzelnen Strainpeaks im

jahreszeitlichen Verlauf ein unterschiedliches Verhalten aufweisen. Des Weiteren ist erkennbar, dass absolut mehr Strainpeaks im Signal auftreten als Risse an der Tunnelinnenschale augenscheinlich vor Ort identifiziert werden konnten.

Erwartungsgemäß kommt es im Winter aufgrund eines Absinkens der Temperatur zur Öffnung der Risse und damit zu einer erhöhten Dehnung an dieser Position, während sich die Risse über den Sommer durch den Anstieg der Temperatur wieder schließen und damit die Dehnung wieder abnehmen sollte. Die meisten Strainpeaks repräsentieren dieses Verhalten sehr gut, indem diese im Verlauf der epochenweisen Messungen über den Winter zunächst ansteigen und über den Sommer annähernd wieder die Ursprungsdehnung der Messungen aus dem Vorjahr aufweisen. Einige Strainpeaks jedoch zeigen ein nicht zu erwartendes Verhalten. Während der Strainpeak bei der Rissposition $R6_1$ beispielsweise über die gesamte Messzeit eine Zunahme der Dehnung aufweist, zeigt der Strainpeak bei der Rissposition $R2_2$ bei der letzten Messung eine Stauchung. Zudem weisen die einzelnen Strainpeaks an den Kreuzungspunkten mit Riss $R12$, welcher mehrmals überkreuzt wurde, ein unterschiedliches Verhalten auf.

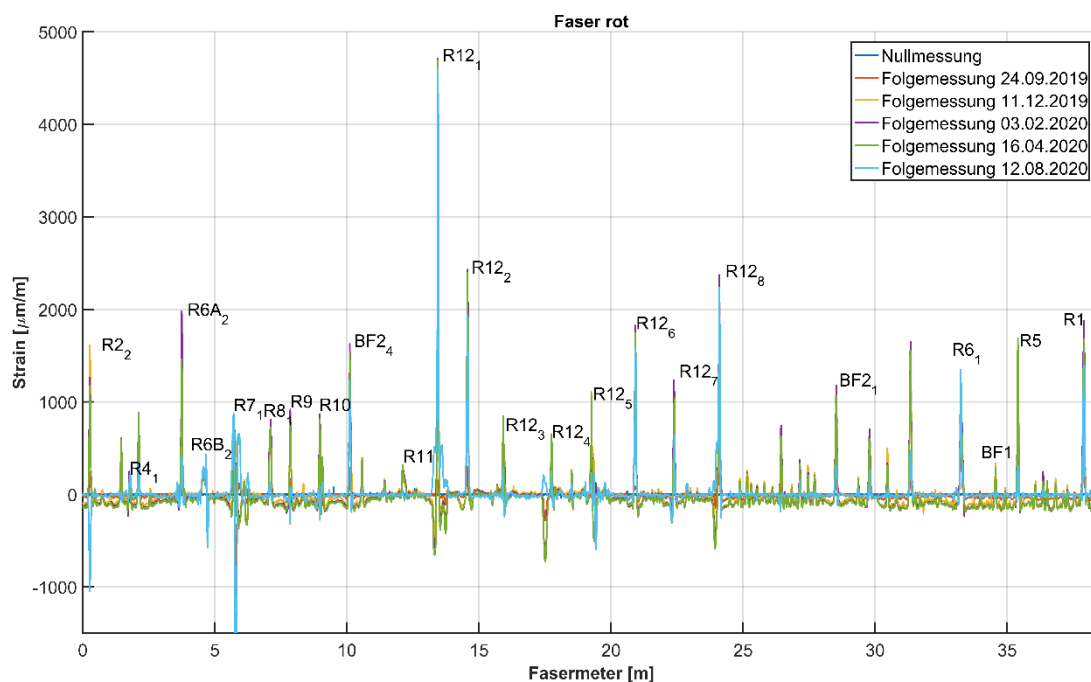


Abbildung 13: Dehnungsprofile entlang der roten Messlinie 1 für alle gemessenen Epochen

Betrachtet man die Kreuzungspunkte des Risses $R12$ im Detail (siehe Abbildung 14), so zeigen die Strainpeaks in den äußeren Bereichen eine wesentlich größere Dehnung als jene im mittleren Bereich. Die Strainpeaks im mittleren Bereich weisen dabei im Verlauf des

Jahreszyklus das erwartete Verhalten (Anstieg der Dehnung über den Winter und Rückgang der Dehnung im Sommer) auf, während die Strainpeaks in den äußeren Bereichen keinen Rückgang der Dehnung im Sommer aufzeigen.

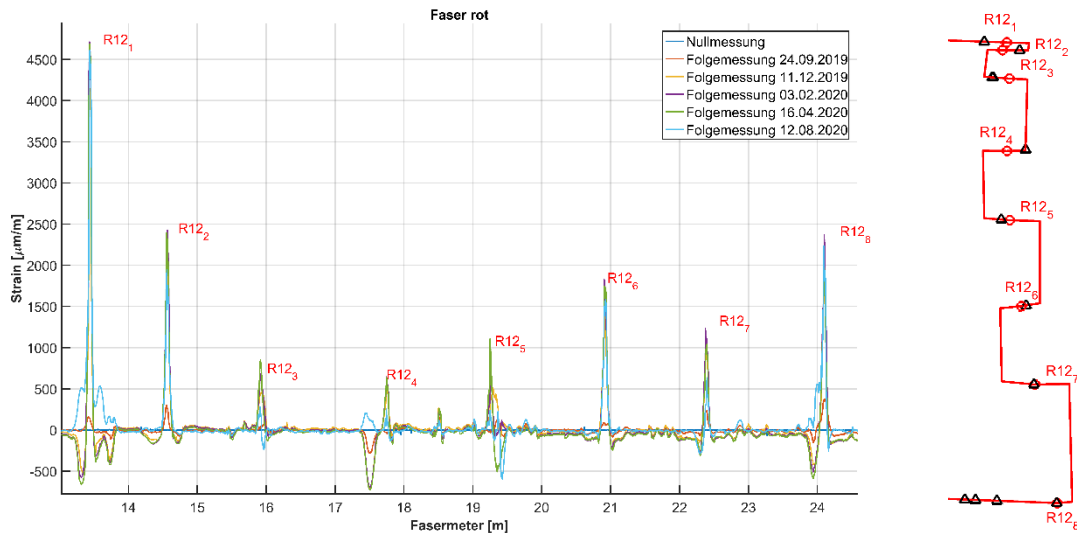


Abbildung 14: Detaillierte Ansicht des Bereichs der Kreuzungspunkte von Riss R12

Die im Bereich zwischen Fasermeter 24.5 und 28.0 auftretenden Strainpeaks, die bislang nicht zugeordnet werden konnten, sind in Abbildung 15 in einer Detailansicht dargestellt. Der Abstand der Strainpeaks zueinander beträgt ca. 30 cm und ließ zunächst auf die Betoniergrate, die sich in diesen Bereich befinden, schließen.

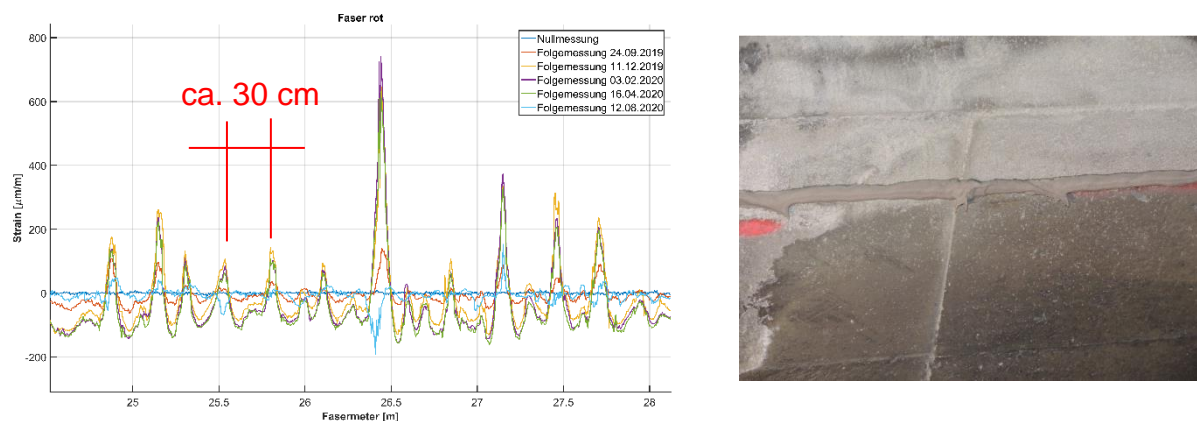


Abbildung 15: Detaillierte Ansicht der unbekannt Strainpeaks im Bereich zwischen Fasermeter 24.5 und 28.0 (links) und der vermuteten Ursache (Betoniergrate) dieser Peaks (rechts)

Bei einer Absteckung der Peakpositionen vor Ort, welche aufgrund der tachymetrischen Verortung der Messlinien problemlos möglich war, konnten jedoch feine Haarrisse als Ursache für diese Peaks identifiziert werden. Die Vermutung liegt dabei nahe, dass diese Haarrisse bereits bei der Installation der faseroptischen Fasern vorhanden waren, jedoch aufgrund der schlechten Lichtverhältnisse nicht augenscheinlich ersichtlich waren.

In weiterer Folge werden zwei ausgewählte Peaks (R1 und R2₂) der roten Messlinie 1 im Detail erläutert.

Abbildung 16 zeigt eine Detailansicht der Dehnungsprofile von Riss R1 der roten Messlinie 1, welcher ein annähernd erwartungsgemäßes Verhalten aufweist. Dabei kommt es bis zur Epochenmessung am 03.02.2020 zu einer Zunahme der Dehnung. Bei den folgenden Messungen im April und August, weist der Strainpeak einen geringfügigen Rückgang auf, geht jedoch nicht wieder in die Ursprungsdehnung vom 24.09.2019 zurück.

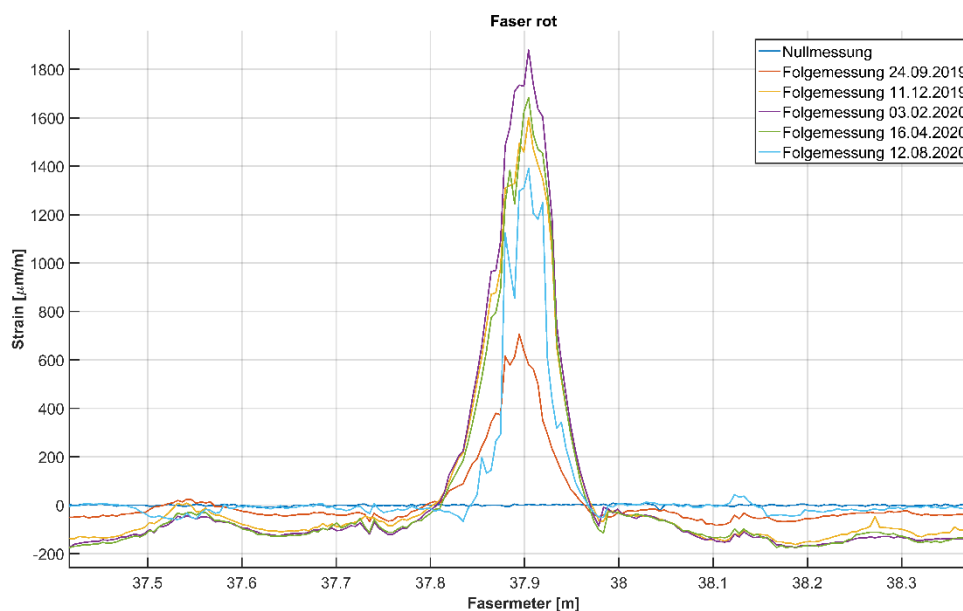


Abbildung 16: Detailansicht der Strainpeaks an Rissposition Riss R1 der roten Messlinie 1 aller Epochenmessungen

Eine Gegenüberstellung der Peakhöhe gegenüber dem Verlauf der Temperaturänderung in Abbildung 17 zeigt einen wie zu erwartendem gegenläufigem Verlauf. Eine Temperaturabnahme resultiert dabei in einer Zunahme der Dehnung, während eine Zunahme der Temperatur einen Rückgang der Dehnung zur Folge hat. Dies lässt auf eine temperaturabhängige Rissatmung schließen.

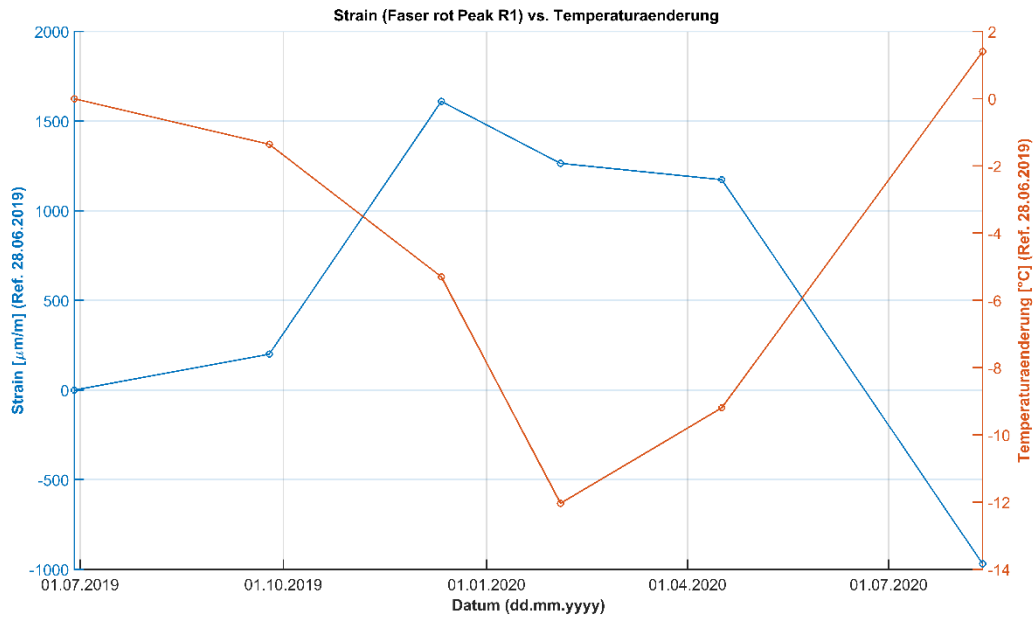


Abbildung 17: Gegenüberstellung der Peakhöhe von Riss R1 der roten Messlinie 1 und des Temperaturverlaufs aller Epochenmessungen

Auch in Abbildung 18 wird der indirekte Zusammenhang zwischen Dehnungsänderung und Temperaturänderung nochmals verdeutlicht.

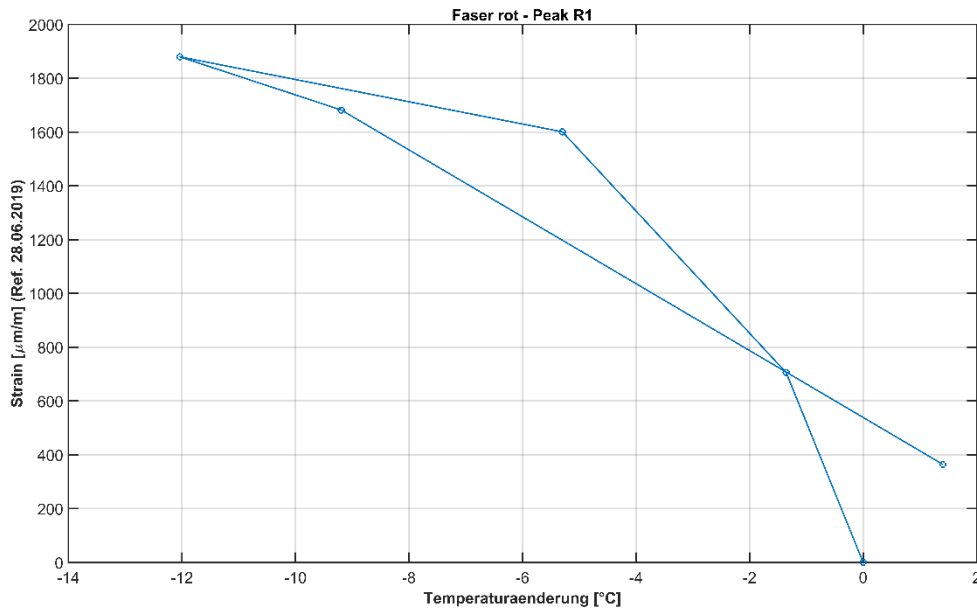


Abbildung 18: Darstellung der Peakhöhe in Abhängigkeit der Temperaturänderungen an Rissposition R1 der roten Messlinie 1 für alle Epochenmessungen

In Abbildung 19 ist eine Detailansicht des Strainpeaks an der Rissposition R2₂ der roten Messlinie 1 für alle Epochenmessungen dargestellt. Der Strainpeak an dieser Rissposition zeigt zunächst, wie zu erwarten, aufgrund der Temperaturabnahme über die Wintermonate eine Zunahme der Dehnung. Im Gegensatz zur Rissposition R1 aus Abbildung 16 zeigt sich hier jedoch bereits ab der Epochenmessung am 03.02.2020 eine leichte Abnahme der Dehnung. Bei der Epochenmessung am 12.08.2020 weist der Strainpeak sogar eine erhebliche Stauchung auf. Die Ursache für dieses Verhalten konnte bisher noch nicht erforscht werden.

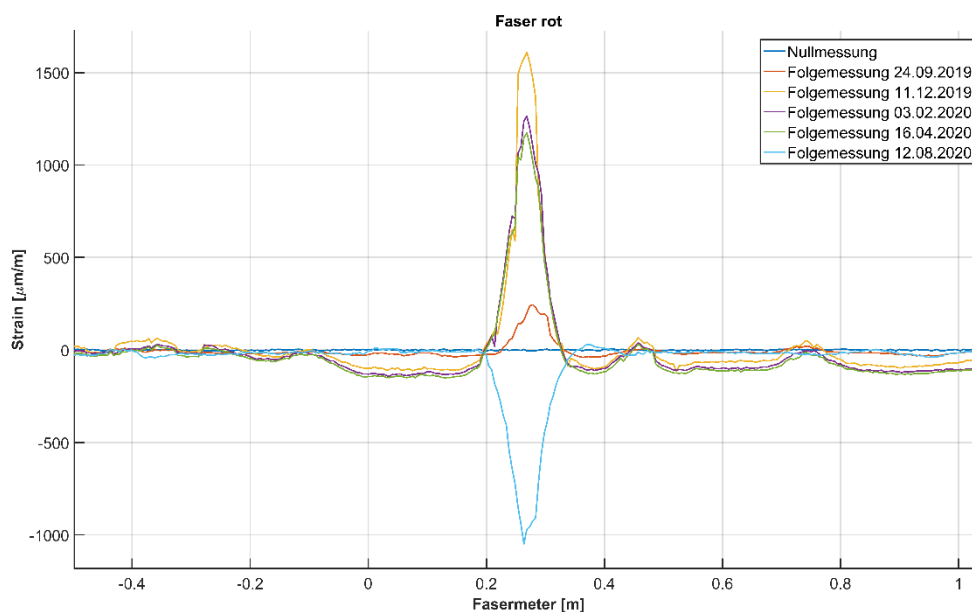


Abbildung 19: Detailansicht des Strainpeaks an Rissposition R2₂ der roten Messlinie 1 aller Epochenmessungen

Auch in nachfolgender Abbildung 20, welche wiederum die Peakhöhe in Abhängigkeit der Temperaturänderung darstellt, ist das zuvor beschriebene Verhalten nachzuvollziehen.

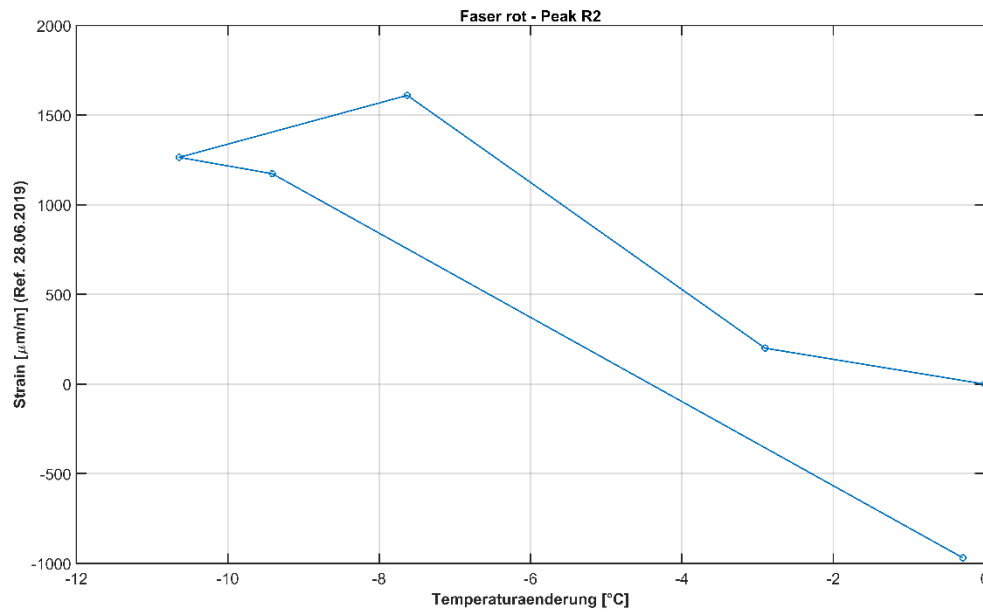


Abbildung 20: Darstellung der Peakhöhe in Abhängigkeit der Temperaturänderungen an Rissposition R2₂ der roten Messlinie 1 für alle Epochenmessungen

1.3.2 Konventionelle Messungen

Die Messung der Oberflächen- wie auch Lufttemperaturen (Abbildung 21) zeigt, dass Temperatur Extrema am Portal nur stark abgeschwächt an der Messstelle ankommen. Die Lufttemperatur im Bauwerk schwankte im Jahresgang zwischen maximal ca. 22°C und minimal 4°C. Die Oberflächentemperaturen schwankten zwischen maximal ca. 20°C und minimal 5°C. Die Temperatur an der Feuchtstelle lag meist etwas (ca. 1°C) unter jener der trockenen Oberfläche.

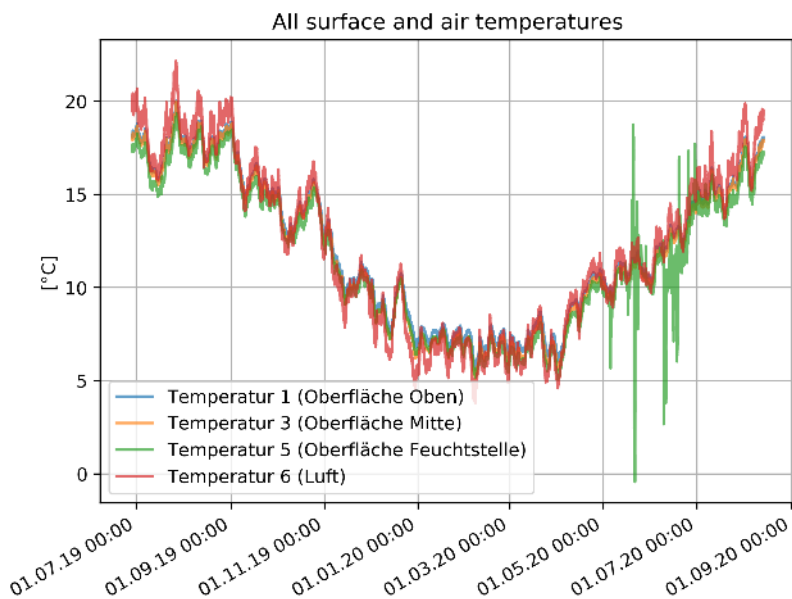


Abbildung 21: Messung der Oberflächen- und Lufttemperatur über den gesamten Messzeitraum. Bei Sensor T5 treten ab Anfang Mai fehlerhafte Messwerte auf.

Wie erwartet schwankten die Temperaturen des Temperaurprofils weniger als jene der Oberflächen und der Luft. Der Temperaturgradient der Innenschale ist dabei bei einer Temperatur zwischen 14°C-16°C am geringsten während dieser bei Oberflächentemperaturen von ca. 5°C etwa 0.1°C/cm beträgt (Abbildung 22).

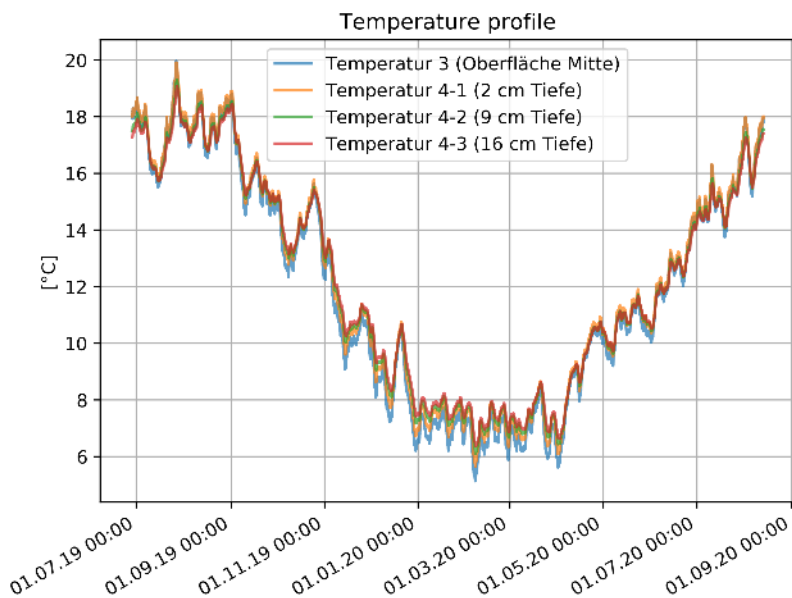


Abbildung 22: Messung des Temperaturprofils über den gesamten Messzeitraum

Interessant an der Temperaturmessung ist auch die Zeit, die es benötigt bis eine Temperaturspitze im Tunnel „ankommt“ (Abbildung 23). Da am Portal im Zuge des Projektes keine Temperaturen gemessen wurden, wurden auf Basis von Messwerten modellierte Werte für Flachauwinkl von meteoblue.com herangezogen. In dieser Auswertung hat sich gezeigt, dass ein Temperaturmaximum der Lufttemperatur an der Messstelle im Tunnel etwa 3 bis 5 Stunden nach Erreichen des Maximums im Freien vor den Portalen auftritt. Da aber die Rissatmung vor allem mit der Betontemperatur korreliert, ist vor allem die Verzögerung hier von Interesse. Diese beträgt etwa 10-14 Stunden.

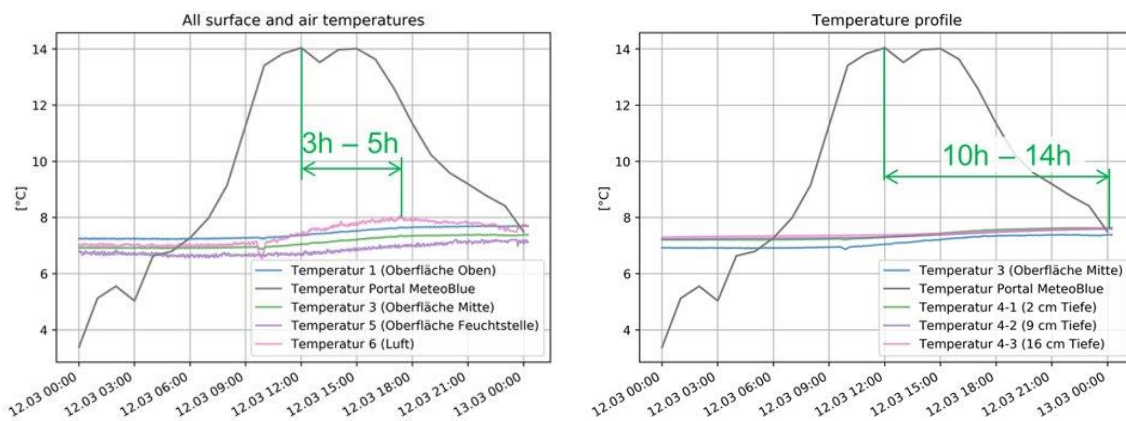


Abbildung 23: Zeitverzögerung des Erreichens von Temperaturspitzen an der Messstelle. Spitzenwerte der Lufttemperatur am Portal führen demnach an der Messstelle nach 3 h – 5 h zu einem Maximum der Lufttemperatur (links). Vom Spitzenwert am Portal vergehen bis zum Spitzenwert im Beton (ca. 16 cm unter der Oberfläche) 10 h – 14 h (rechts).

Bei der Wegmessung wurde im Jahresverlauf bei den Radialrissen bzw. bei der Blockfuge ein Rissatmen von 0,15 mm - 0,25 mm beobachtet, wobei bei WS1 die meiste Bewegung aufgezeichnet wurde. Bei all diesen Rissen zeigte sich, dass wenn die Wegmessung in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt wird, die kleinste Hysterese bei Verwendung der Temperaturmessung in 16 cm Tiefe zu sehen ist. Bei allen Radialrissen konnte ein annähernd lineares Rissatmen beobachtet werden.

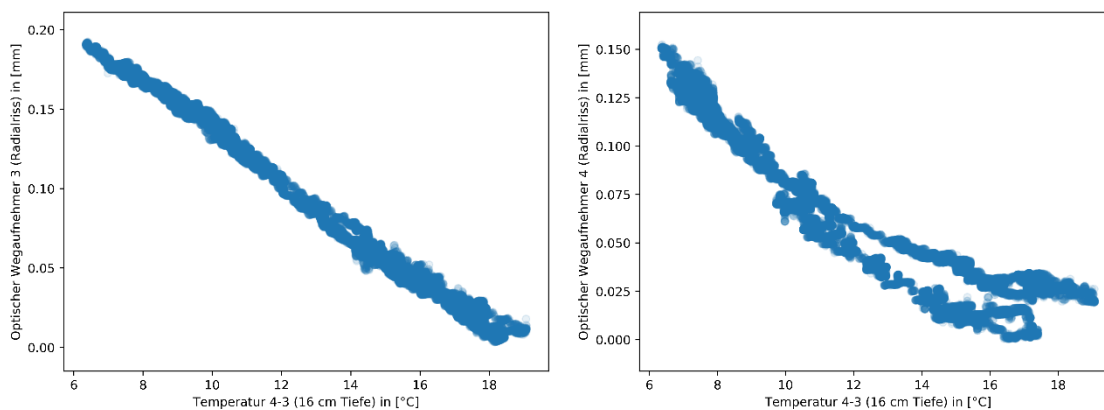


Abbildung 24: Zusammenhang von Betontemperatur 16 cm unter der Oberfläche und der Messung mit optoelektronischen Wegaufnehmern an den Messstellen 3 (links) und 4 (rechts).

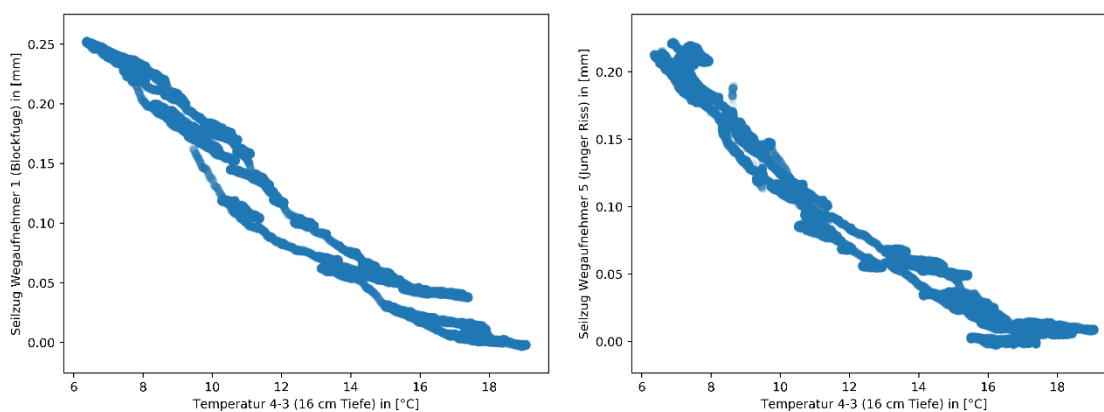


Abbildung 25: Zusammenhang von Betontemperatur 16 cm unter der Oberfläche und der Messung mit Seilzugwegaufnehmern an den Messstellen 1 (links) und 5 (rechts)

Ein deutlich anderes und schwieriger zu interpretierendes Verhalten ist bei Sensor WS2 zu beobachten (siehe Abbildung 26). Hier handelt es sich um einen stark, fast zu einem Längs-
riss, geneigten Riss. Dieser Riss ist der einzige der konventionellen Messung, welcher normal zur Tunnelrichtung gemessen wird. Da es sich aber um einen Radialriss, welcher sich stark krümmt handelt, ist davon auszugehen, dass der Großteil der Rissbewegung an dieser Stelle in Rissrichtung stattfindet. Diese Bewegung ist für den optoelektronischen Sensor nicht wahrnehmbar, während der Seilzugsensor in Abhängigkeit des Winkels des Messeils zum Riss minimale Längsänderungen misst. Da die gemessenen Bewegungen kleiner als 0,1 mm waren, sind hier die Ergebnisse entsprechend schwierig zu interpretieren und streuen entsprechend.

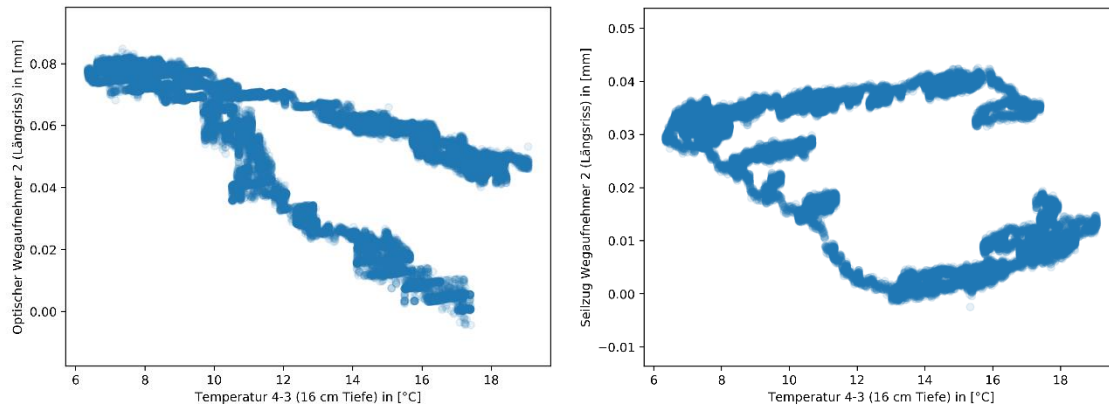


Abbildung 26: Zusammenhang von Betontemperatur und Wegmessung an der Stelle WS2. Zu sehen ist die Messung mit optoelektronischem Wegaufnehmer (links), mit Seilzugwegaufnehmer (rechts).

1.3.3 Rissbreitenbestimmung aus DFOS

Basierend auf den aus DFOS gemessenen Dehnungssignalen, wurden die Risse mittels der im AP4 (D 4) beschriebener automatisierten Risserkennung ausgewertet. Es wurden die Dehnungsspitzen identifiziert, deren Rissposition mit einer Genauigkeit ca. +/- 3,5cm entsprechen. Zu jeder Dehnungsspitze wurde die aktivierte Länge in der Form von zwei Punkten beidseitig vom Riss festgelegt (siehe Prinzipskizze Abbildung 27). Dazu wurden die Einstellungen wie im Bericht D 4 (Kapitel 1.4) beschrieben verwendet.

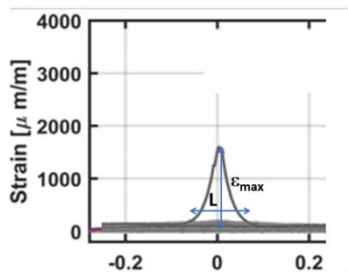


Abbildung 27 Prinzipielle Darstellung Dehnungsspitze und aktivierte Faserlänge L

Die gemessenen Dehnungssignale wurden über die identifizierte aktivierte Faserlänge integriert, was wie bereits eingehend dargestellt direkt der Rissweite bei orthogonaler Risskreuzung entspricht. Diese wurde für alle epochalen Messungen und alle identifizierten Risse ausgewertet, und ist beispielhaft in Abbildung 28 dargestellt.

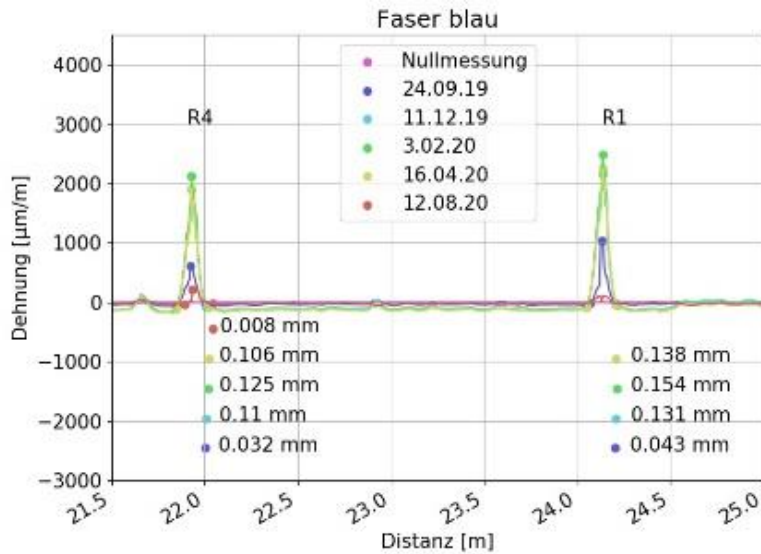


Abbildung 28 Beispielhafte Bearbeitung des Dehnungssignal mit automatisch erkannten Rissen und ausgewerteten Rissweiten

Auf diese Weise entstehen Einzelmesspunkte, die man anhand eines bekanntes Rissbildes verbinden kann. In diesem Fall des Messlayouts wurden bewusst Risse mehrmals (Abbildung 29) von den einzelnen Fasern gekreuzt, weshalb diese noch entsprechend zugeordnet werden müssen.

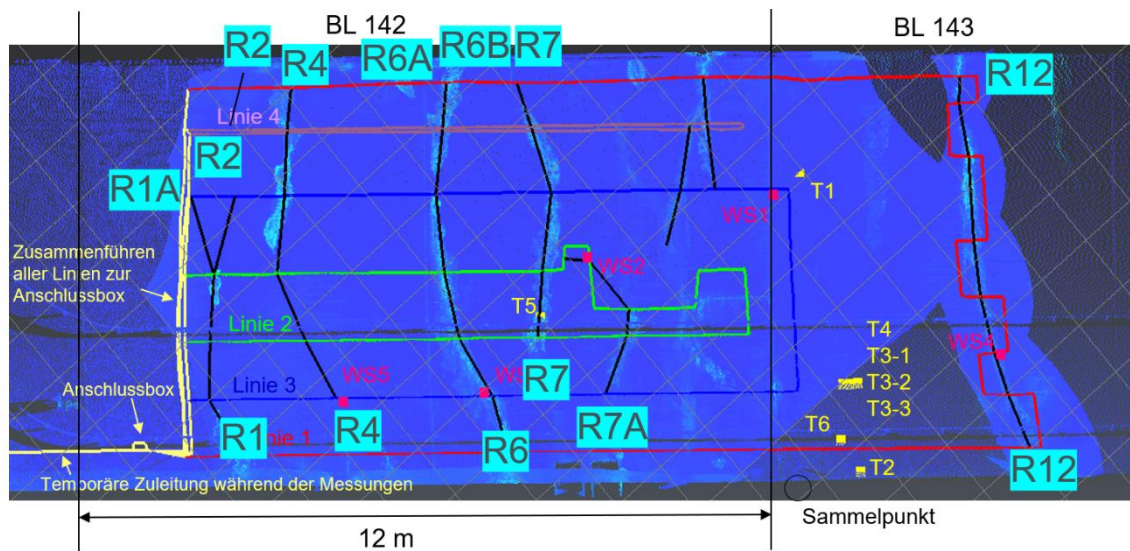


Abbildung 29 Übersicht Rissbezeichnungen

In der Abbildung 30 sind die den entsprechenden Rissen zugeordneten Dehnungssignale zusammen mit der dazugehörigen Faserbezeichnung dargestellt.

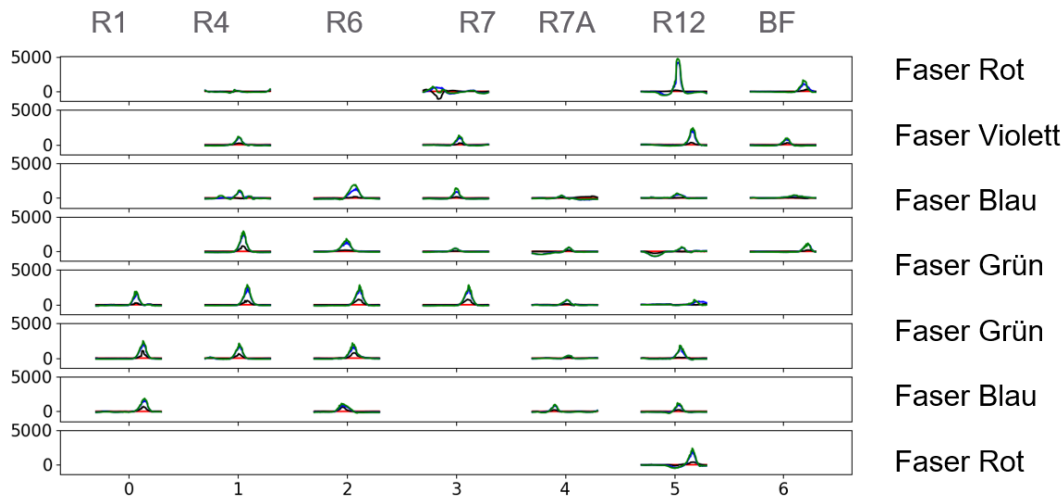


Abbildung 30 Clustering anhand der bekannten Rissbildes

Durch das Verbinden der einzelnen Rissweiten zusammengehöriger Risse kann die Rissbewegung über die Risslänge dargestellt werden. In der Abbildung 31 ist als Beispiel der Riss R2 (relativ kurzer Riss, oberhalb von Riss 1 in der Nähe der Firste) dargestellt, der an zwei Stellen, Linie 1 (rot) und 4 (violett), von der Messfaser gekreuzt wurde. Die Dehnungssignale und ausgewerteten Rissweitenänderungen über Risslänge der Epochenmessungen sind in Abbildung 31 zeitlich verteilt dargestellt. Aufgrund der beiden Messpunkte werden die Weitenmessungen den einzelnen Zeitpunkten nach Farben geordnet miteinander verbunden, und zeigen so schematisch die zeitliche Rissentwicklung über die Risslänge. Nachdem die Messung einen gesamten Jahreszyklus erfasst, schließen sich die Risse nach einem Jahr nahezu wieder zu der ursprüngliche Rissweite W_{ini} . Manchmal sind die Risse wie z.B. der in Abbildung 31 dargestellte Riss R2 am Ende sogar weiter geschlossen als bei der Nullmessung.

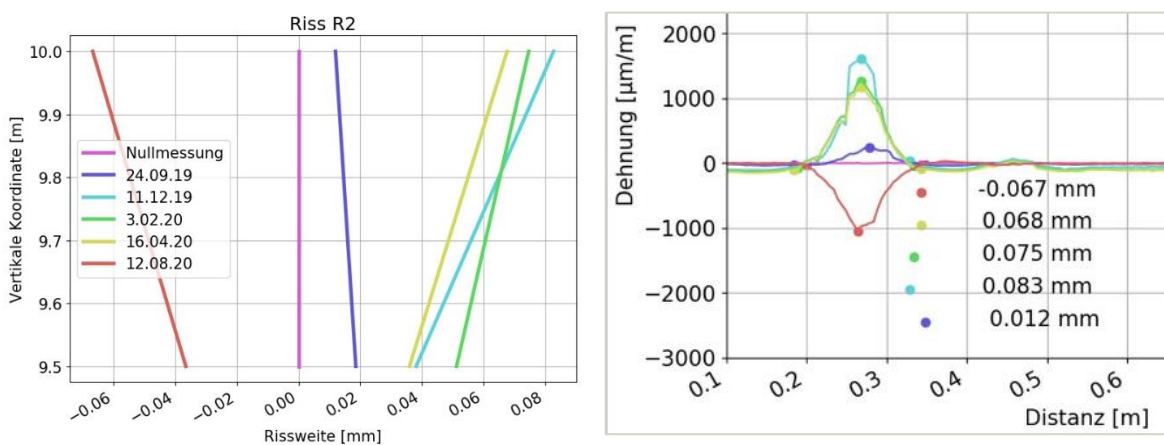


Abbildung 31 Riss R2; Links: zeitliche Entwicklung der Rissweite über die Risslänge; Rechts Dehnungssignal der Linie 1 mit Rissweiten bei der Koordinate 10 m

In Abbildung 32 wurde der Rissverlauf des Radialrisses R6 über seine Risslänge dargestellt. Dieser Riss wurde 6-mal von verschiedenen Messfaserlinien gekreuzt. Das Ergebnis der Auswertung der Rissweite über die Länge von ca. 10 m ist damit auch mit einer gewissen Streuung behaftet. Diese hat zum einem eine Tendenz in der Mitte größer zu sein, zu anderem weist diese eine allgemeine Schwankung von bis zu 0,15 mm auf.

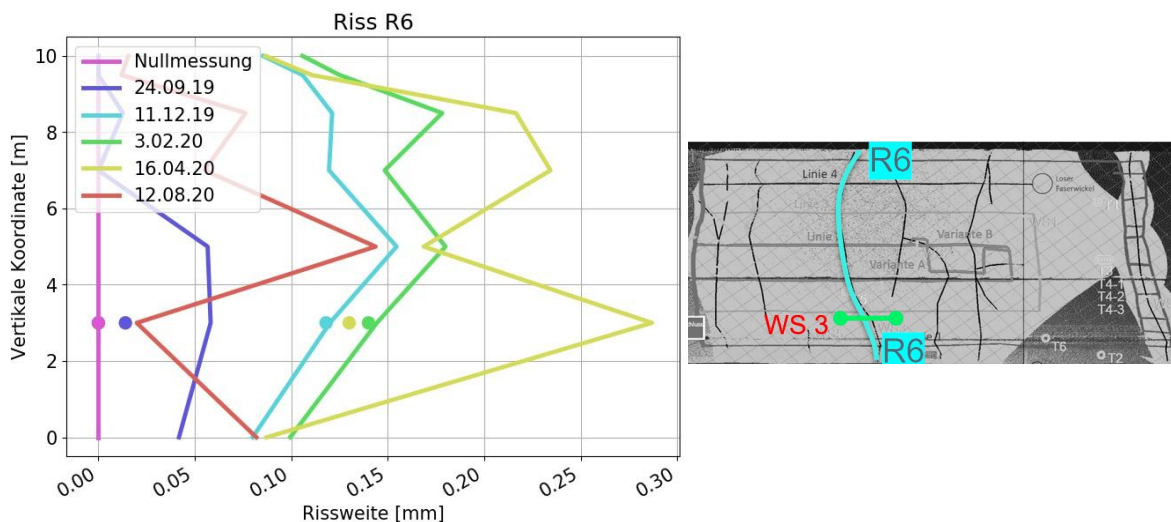


Abbildung 32 Riss R2; Links: zeitliche Entwicklung der Rissweite über die Risslänge; Rechts: Übersicht

Als Referenzmessung werden die Auswertungen der konventionellen Sensoren herangezogen. An drei Stellen befinden sich nah beieinander sowohl die optoelektronisch Sensoren (OP) als auch die Seilzugwegaufnehmer (WS). Diese wurden zum Vergleich mit den faseroptischen Messungen (DFOS) herangezogen, damit auch die Messstreuung der Referenzsensoren mitberücksichtigt werden kann (siehe Tabelle 2)

Tabelle 2 Vergleich der verschiedenen Messsystemen: Epochale Messung in mm

Sensor	Std. Abweichung	Mittelwert - absolut	Maximale Abweichung - absolut
WS - OP	0,046	0,037	0,128
DFOS - OP	0,044	0,027	0,151
DFOS - WS	0,052	0,038	0,121
LABOR	0,006	0,006	0,017

In der Abbildung 33 enthält die Auswertung dieser Stellen über den Messzeitraum und eine Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der optoelektronisch (OS: blau) und Seilzugwegsensoren (WS: grün) im 15 min Takt. Die epochalen Messungen mittels der Messfaser wur-

den mit farbigen Punkten markiert: rot die Stelle in unmittelbarer Nähe der Referenzsensoren, gelb zum Vergleich eine Stelle in 1 bis 2 m Entfernung. Die Differenzen zwischen den Messwerten den jeweiligen Sensoren wurden statistisch ausgewertet und in der Tabelle 2 mit Standardabweichung, absolutem Mittelwert und absoluter maximalem Unterschied zusammengefasst. Die Streuung der beiden Referenzmessungen ist vergleichbar mit jener der faseroptischen Messungen. Die Abweichungen liegen meistens unter 0,05 mm und überschreiten nur in seltenen Fällen 0,1 mm. Es ist zu beachten, dass die im Labor erzielten extrem hohen Genauigkeiten im Tauerntunnel nicht erreicht werden, die Anforderungen jedoch trotzdem mit maximaler Abweichung von 0,15 mm erfüllt werden konnten.

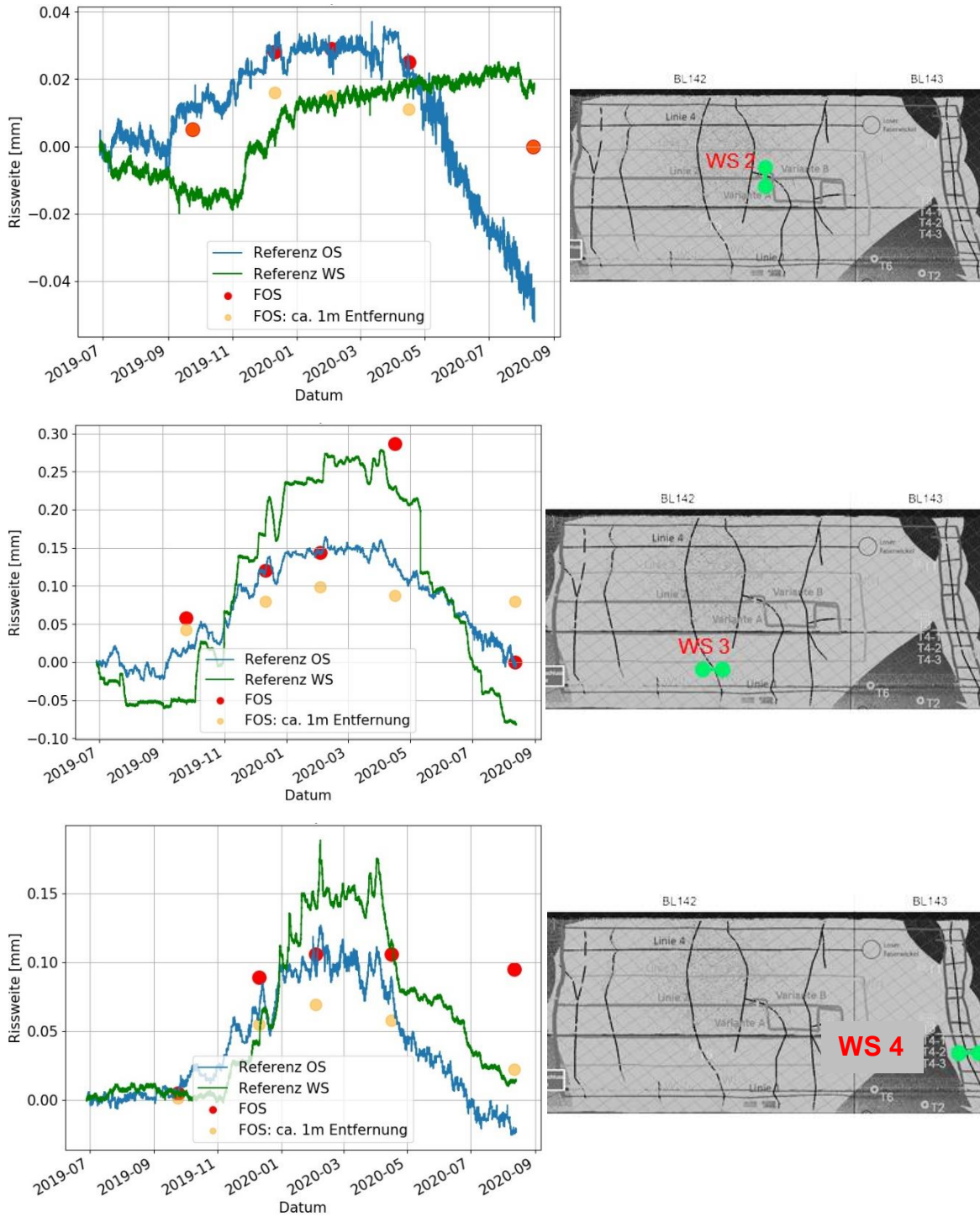


Abbildung 33 Vergleich der gemessenen Rissweiten zwischen konventionellen (OS, WS) und Faseroptischen Sensoren

1.4 Dauermessung

1.4.1 Faseroptische Messungen

Die Dauermessung fand vom 02.03.2020 bis zum 16.04.2020 statt. Gemessen wurde wiederum mit dem Luna OBR unter Verwendung des optischen Switches. Das Messinstrument und der optische Switch wurden zu diesem Zweck in einem zeitlichen Intervall von 30 Minuten vollautomatisch angesteuert und die Messungen durchgeführt.

In Abbildung 34 ist die Peakhöhe an der Rissposition R1 der roten Messlinie 1 der Temperaturänderung während der gesamten Dauermessung gegenübergestellt. Die Dehnungsänderungen während der Dauermessung fielen dabei sehr gering aus und betragen lediglich ca. 60 $\mu\text{m/m}$. Zudem zeigt sich wiederum das gegenläufige Verhalten von Dehnungsänderung und Temperaturänderung, wenn auch mit einer Zeitverzögerung von einigen Stunden. Diese Zeitverzögerung resultiert daraus, dass der Beton der Tunnelinnenschale erst mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung auf die auftretende Temperaturänderung reagiert. Im Rahmen der Epochenmessungen kam diese zeitliche Verzögerung nicht zum Tragen, hier wird sie sich jedoch aufgrund des Messintervalls von 30 Minuten sichtbar.

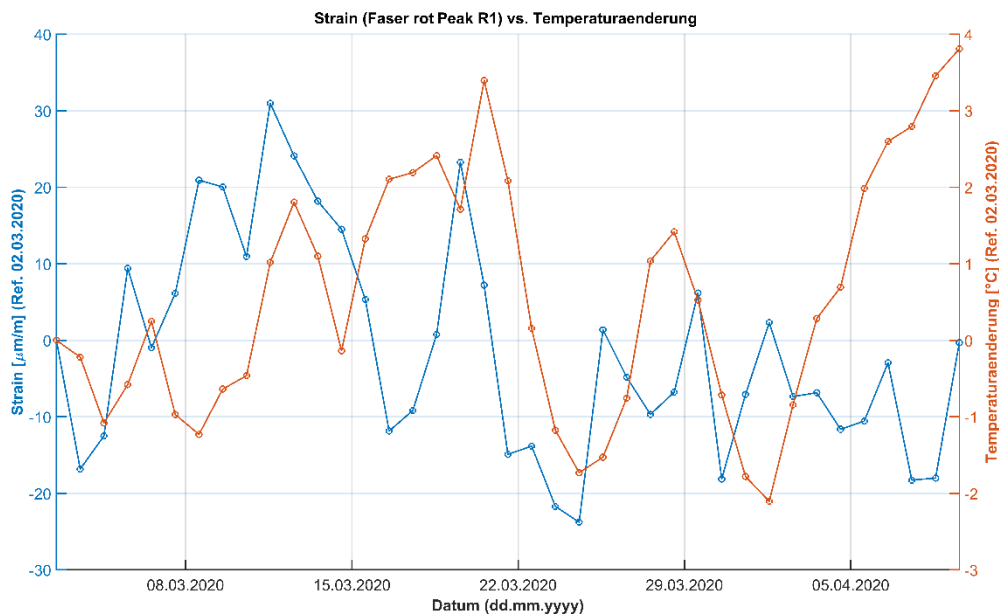


Abbildung 34: Gegenüberstellung der Peakhöhe von Riss R1 der roten Messlinie 1 und des Temperaturverlaufs während der gesamten Dauermessung

Bereits während der Epochenmessung fiel immer wieder auf, dass vereinzelte Messungen starke Störungen aufwiesen, sodass diese nicht mehr für die Auswertung herangezogen

werden konnten. Die Vermutung für diese Störungen fiel dabei auf Vibrationen der Tunnelinnenschale bzw. Zwischendecke aus dem laufenden Verkehr des Tunnels. Im Fokus als potenzielle Auslöser dieser Vibrationen standen dabei vor allem LKWs, da beim Durchfahren eines solchen ein Vibrieren der Tunnelzwischenendecke bereits physisch wahrzunehmen war. Zu diesem Zweck wurde eine Zeitreihe hinsichtlich der Verfügbarkeit des Signals über den Zeitraum der Dauermessung erstellt, welche in Abbildung 35 dargestellt ist. Dabei zeigt sich, dass die Signalstörungen vermehrt unter der Woche auftreten. An den üblicherweise schwerverkehrsrärmeren Wochenenden dagegen traten kaum Störungen auf, wodurch die Vermutung, dass die Ursache im LKW-Verkehr liegt, weiter verstärkt wurde.

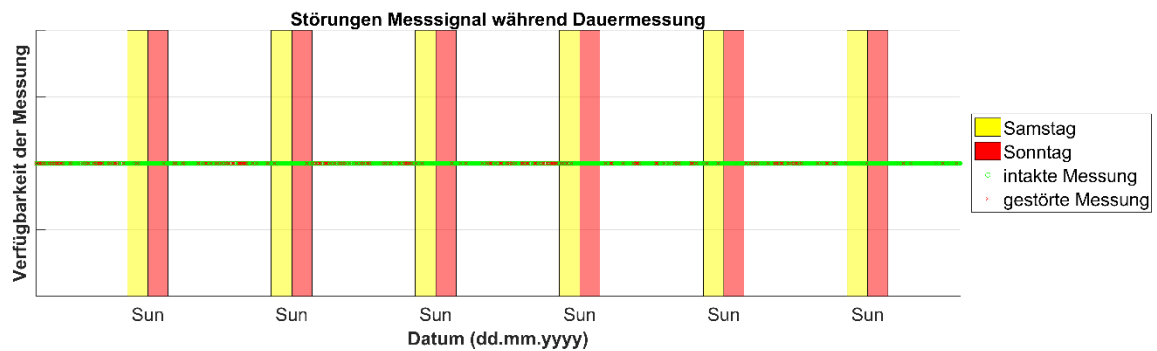


Abbildung 35: Zeitreihe der Verfügbarkeit des Messsignals über den Zeitraum der Dauermessung

Auch eine Darstellung der Signalausfälle in Form eines Histogramms über den Zeitraum der Dauermessung (siehe Abbildung 36) verdeutlicht nochmals, dass die gestörten Messsignale vermehrt unter der Woche und nur in geringer Anzahl am Wochenende auftraten.

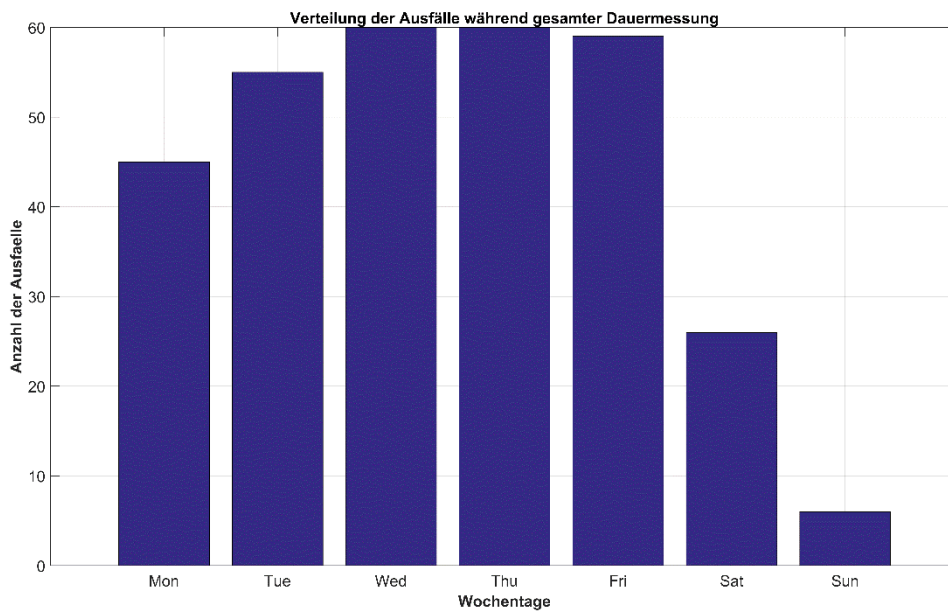


Abbildung 36: Verteilung der Signalausfälle über den Zeitraum der Dauermessung

Durch die Betrachtung der Verteilung der Störung über einen Zeitraum von 24 Stunden konnte die zuvor getroffene Vermutung nochmals bestätigt werden. Die Störungen traten dabei hauptsächlich im Zeitraum zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr auf. Zwischen 23:00 Uhr und 06:00 Uhr traten keine gestörten Messsignale auf.

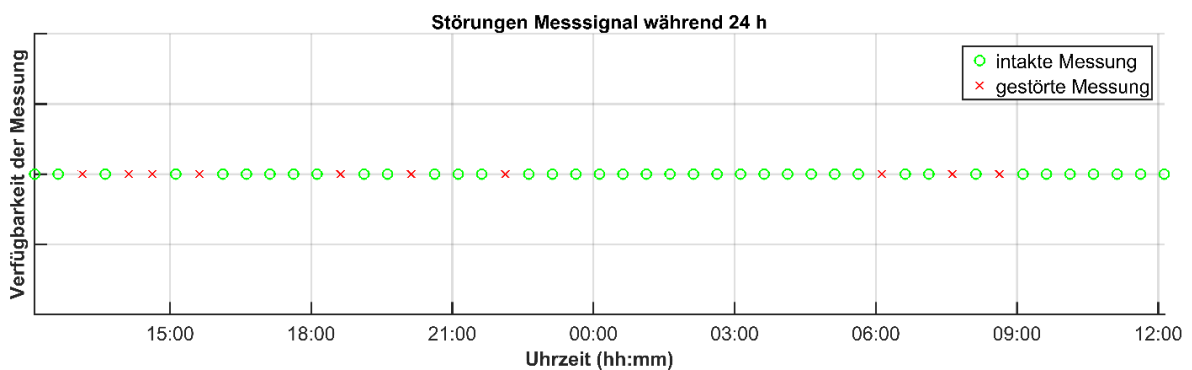


Abbildung 37: Zeitreihe der Verfügbarkeit des Messsignals über einen Zeitraum von 24 Stunden

Dies verdeutlicht auch das Histogramm aus Abbildung 38, in welchem die anzahlmäßige Verteilung der gestörten Messsignale über einen Zeitraum von 24 Stunden dargestellt ist.

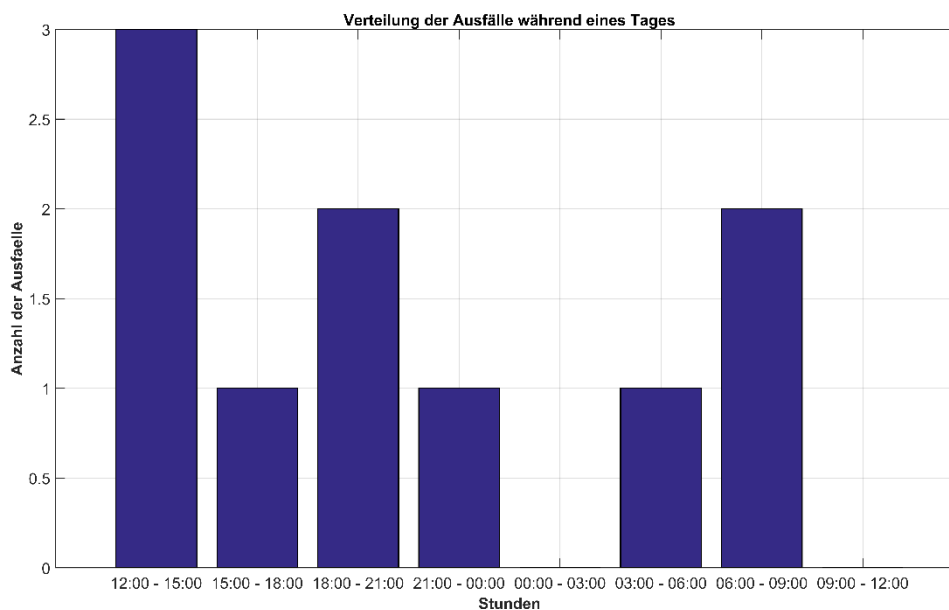


Abbildung 38: Verteilung der Signalausfälle über einen Zeitraum von 24 Stunden

Die Qualität der Ergebnisse wird durch die gestörten Messungen jedoch nicht beeinflusst, da ausreichend von den Störungen unbeeinflusste Messsignale vorhanden sind.

Um die Vermutung zu bestätigen, wurden wie beschrieben als Vergleich Schwingungsmessungen (siehe Kapitel 1.4.3) durchgeführt. Der Einfluss kann prinzipiell bestätigt werden, Grenzwerte, bei welchen noch Messungen durchführbar sind, konnten allerdings auf dieser Grundlage nicht abgeleitet werden.

Hinsichtlich der Qualität der Auswertung ergab sich im Zuge der Messungen im Tauerntunnel eine weitere Problemstellung. Da es sich bei dem verwendeten Messsystem um ein relatives Messsystem handelt, werden alle getätigten Messungen zur Nullmessung unmittelbar nach der Installation referenziert. Die Qualität der Verknüpfbarkeit kann jedoch durch die entlang der Messstrecke auftretende Dämpfungen beeinflusst werden. Treten zu hohe Dämpfungen auf, ist eine Verknüpfung der Messung mit der Nullmessung beispielsweise nicht mehr möglich, wie in nachfolgender Abbildung 39 dargestellt ist.

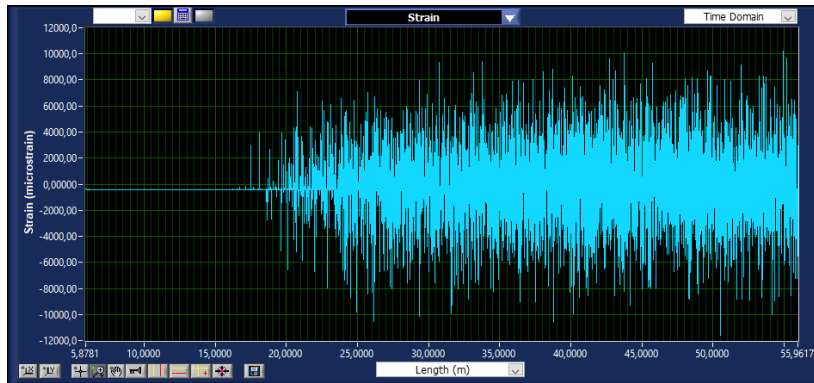


Abbildung 39: Darstellung eines Signal, für welches eine Verknüpfung nicht möglich ist

Die Ursache für das Auftreten von zu hohen Dämpfungen lag in diesem Fall an dem verwendeten optischen Switch, welcher eine Dämpfung von ca. 4.5 dB aufweist. Um dennoch die durchgeführten Messungen verknüpfen zu können, besteht die Möglichkeit, die Auswertung, welche zur Rissdetektion üblicherweise mit einer räumlichen Auflösung von 1 cm erfolgt, mit einer geringeren räumlichen Auflösung durchzuführen. Wie die nachfolgenden Abbildungen zeigen, sind dadurch jedoch einige Einschränkungen zu erwarten.

Beim Übereinanderlegen der Dehnungsprofile (berechnet mit einer räumlichen Auflösung von 1 cm, 2 cm und 4 cm) in Abbildung 40 zeigt sich dabei, dass die Peakhöhe durch die Auswertung einer geringeren räumlichen Auflösung ebenfalls deutlich verringert wird.

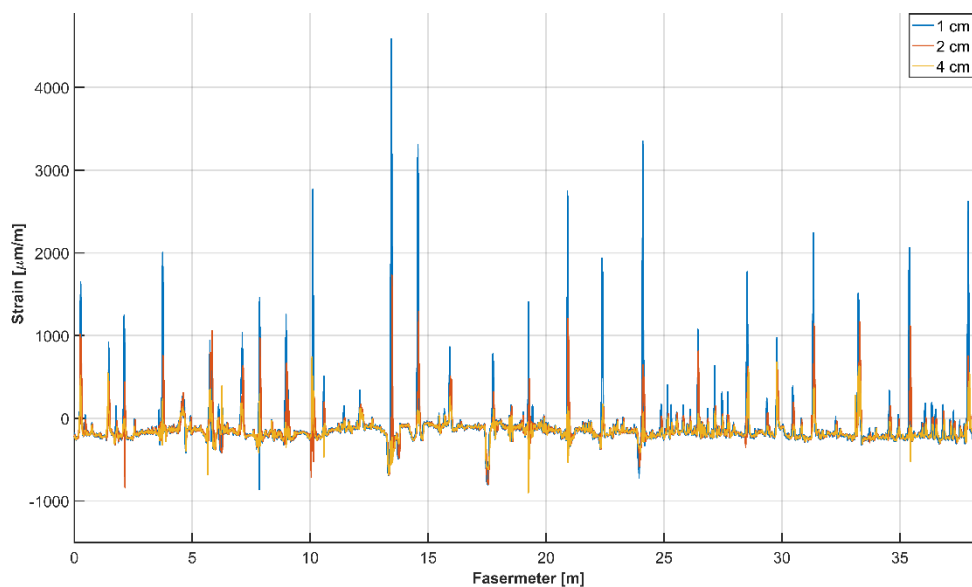


Abbildung 40: Gegenüberstellung der Dehnungsprofile ausgewertet mit einer räumlichen Auflösung von 1 cm, 2 cm und 4 cm

Neben einer Abflachung der Peaks mit zunehmender räumlicher Auflösung zeigt sich zudem eine Verschmierung bzw. geringfügige Aufweitung des Peaks und eine leichte räumliche Verschiebung der Peakposition (siehe Abbildung 41). Dadurch besteht die Möglichkeit die Rissweitenänderung, die als Fläche des Peaks bestimmt wird, zu unterschätzen.

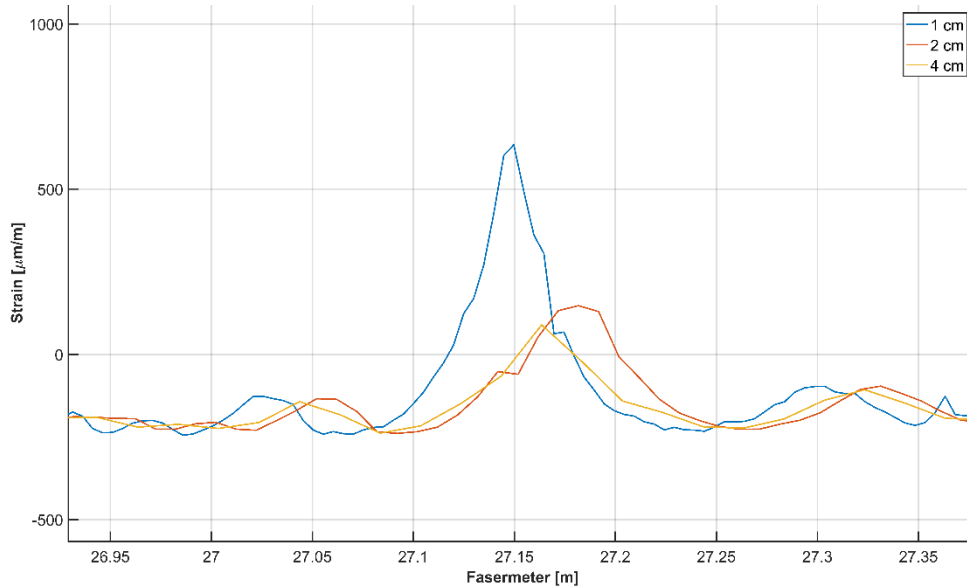


Abbildung 41: Detailansicht eines Strainpeaks ausgewertet mit einer räumlichen Auflösung von 1 cm, 2 cm und 4 cm

Um die Auswertung mit einer räumlichen Auflösung von 1 cm zu ermöglichen, sollte daher im Zuge der Epochenmessungen das Messinstrument direkt an die Messfasern angeschlossen werden. Über den Zeitraum der Dauermessung stellte die zu hohe Dämpfung des optischen Switches kein Problem dar, da über diesen kurzen Zeitraum keine allzu großen Dehnungen aufgrund der Rissbewegungen hinzukamen.

1.4.2 Konventionelle Messungen der Dauermessung

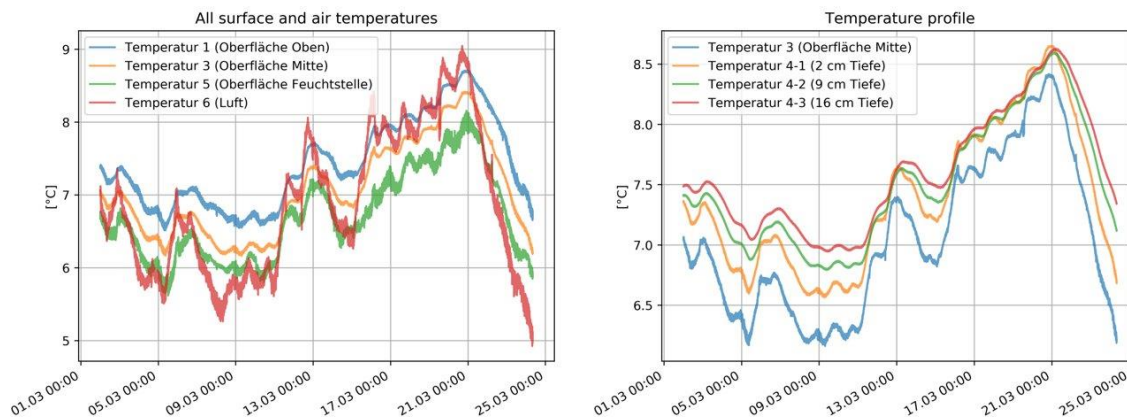


Abbildung 42: Messung der Oberflächentemperaturen, der Lufttemperatur (links) und des Temperaturprofils (rechts) im Zeitraum der Dauermessung der Faser.

Im betrachteten Messzeitraum der Dauermessung wurden an der Messstelle Lufttemperaturen zwischen ca. 5,0°C und ca. 9,0°C gemessen. Für die Temperatur des Betons 16 cm unter der Oberfläche bedeutete dies Schwankungen zwischen ca. 7,0°C und ca. 8,6 °C. Da diese Temperatur am besten mit der Rissatmung korreliert, sind auch nur sehr kleine Rissweitenänderungen zu erwarten.

1.4.3 Schwingung der Zwischendecke

Im Zuge des Projektes wurde auch eine Schwingungsmessung an die Zwischendecke und der Tunnelinnenschale vorgenommen, um Störeinflüsse auf die Fasermessung besser einschätzen zu können.

Die Messung der Zwischendecke erfolgte mit einem Geophon des Typs MR 3000 der Firma SYSCOM. Das Messgerät zeichnete im Zeitraum von 2. bis 25. März 2020 Schwinggeschwindigkeiten (mm/s) in den drei Raumachsen auf. Aufgrund der Datenmenge bei hochfrequenten Aufzeichnungen wurden im Messzeitraum allerdings immer nur die ersten 10 Minuten jeder Stunde aufgezeichnet. Die Sensorposition ist Abbildung 43 zu entnehmen.

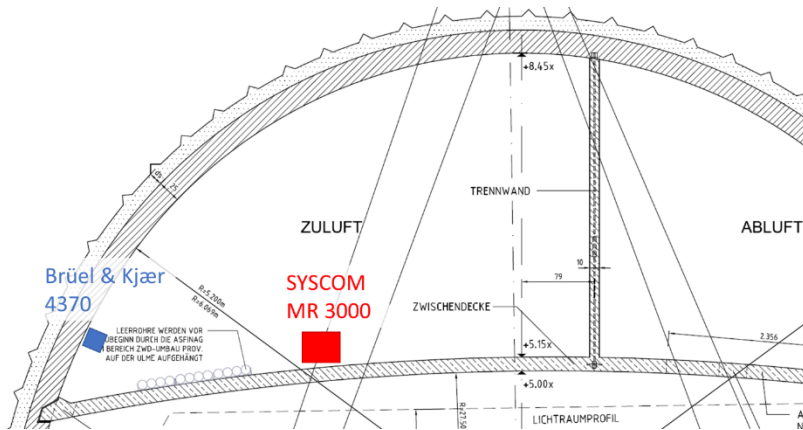
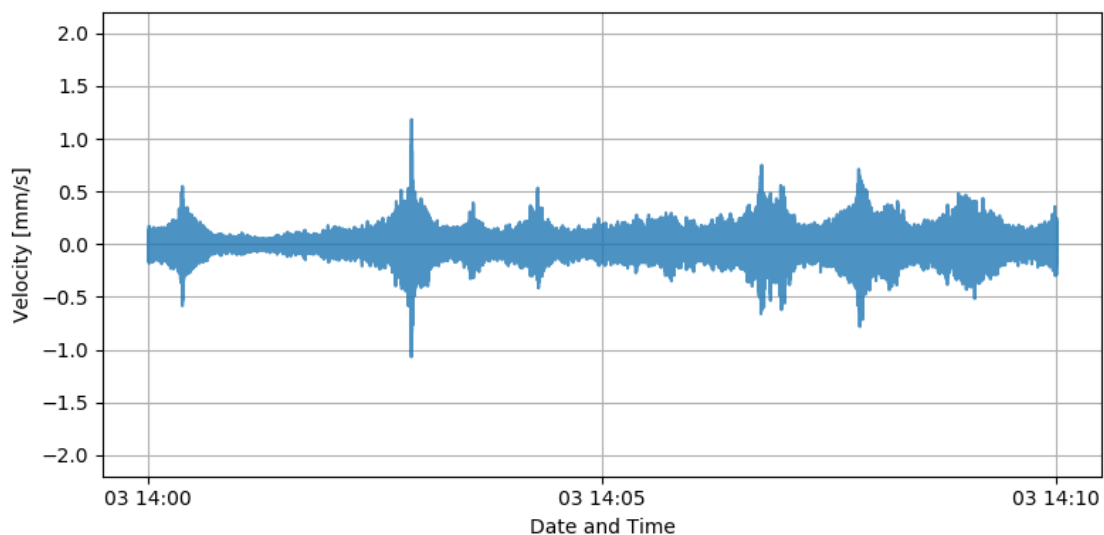


Abbildung 43: Sensorpositionen im Tunnelquerschnitt. Rot das Geophon des Typs MR 3000 der Firma SYSCOM und blau die piezoelektrischen Ladungsbeschleunigungssensoren des Typs 4370 der Firma Brüel & Kjær.

Zusätzlich erfolgten Beschleunigungsmessung an der Tunnelinnenschale mit drei piezoelektrischen Ladungsbeschleunigungssensoren des Typs 4370 der Firma Brüel & Kjær. Die Sensorposition ist ebenfalls der Abbildung 43 zu entnehmen. Hier wurde über denselben Zeitraum wie mit dem Geophon in allen drei Raumachsen mit 1000 Hz gemessen. Allerdings waren die gemessenen Schwingungen sehr gering und nur im Bereich des Sensorrauschens. Sie werden hier nicht weiter behandelt.

Im Folgenden werden die Untersuchungen zu den verkehrsinduzierten Schwingungen der Zwischendecke im Bereich der Messtelle im Detail erläutert.



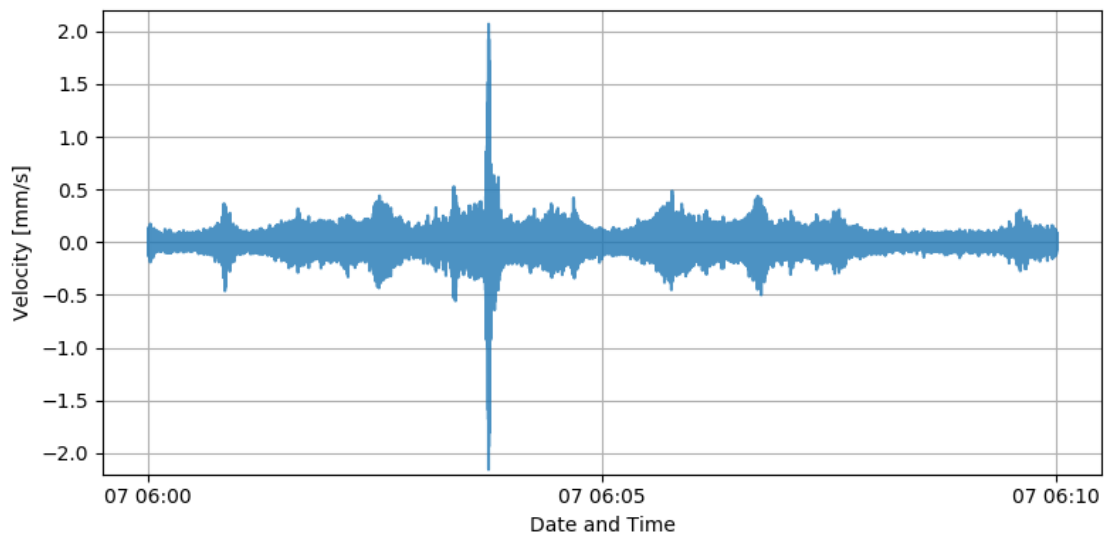


Abbildung 44: Zehn Minuten Schwinggeschwindigkeitsaufzeichnung der Zwischendecke vom 3. März von 14:00 bis 14:10 als Beispiel durchschnittlicher Schwinggeschwindigkeiten bei normalem Verkehrsaufkommen (oben) bzw. vom 7. März von 6:00 bis 6:10 als Beispiel eines Einzelereignisses mit sehr hoher Amplitude >2 mm/s (unten).

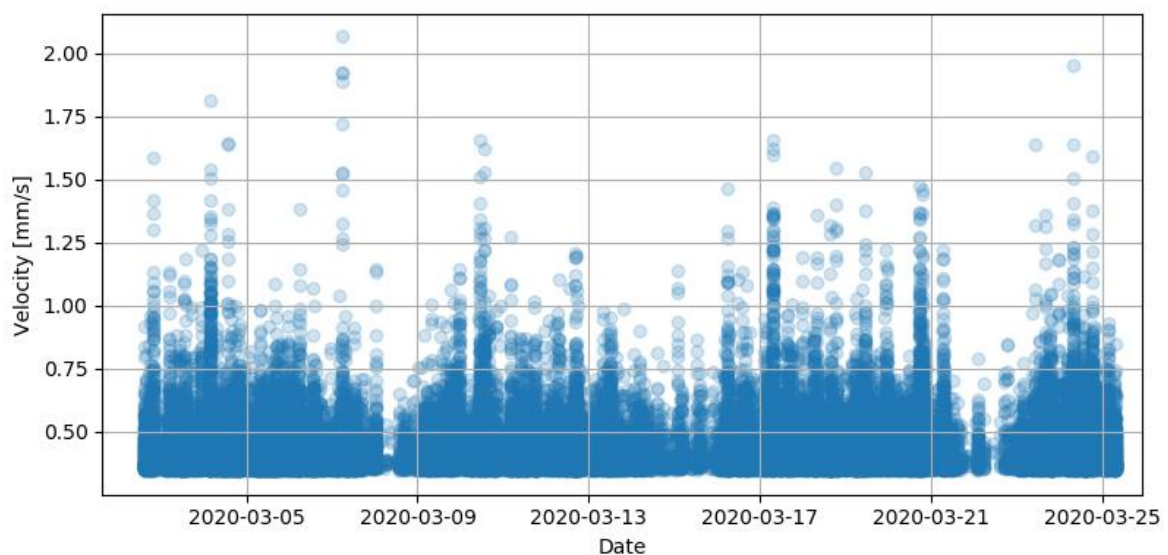


Abbildung 45: Maximalbeschleunigungen über den gesamten Messzeitraum (im Plot sind nur Messwertspitzen die das 0,1 % Perzentil überschreiten dargestellt)

Im Messzeitraum konnte an den gewählten Sensorpositionen eine maximale Schwinggeschwindigkeit von 2,07 mm/s aufgezeichnet werden (siehe Abbildung 44 unten und Abbildung 45). Schwinggeschwindigkeiten größer 1,5 mm/s werden mindestens 1-mal pro Tag erreicht oder überschritten, Werte bis zu 1 mm/s treten wochentags alle paar Minuten auf. In Abbildung 45 ist außerdem auch das LKW-Wochenendfahrverbot deutlich zu sehen, hier

sinken die Schwinggeschwindigkeiten deutlich. Werte größer 0.75 mm/s sind in diesen Phasen äußerst selten. Diese Werte stellen nur eine Grundgröße zur Abschätzung des Einflusses auf das Messsystem dar, können aber nicht für Bewertung der Zwischendecke herangezogen werden, dazu müssten noch weitere gezieltere Untersuchungen durchgeführt werden.

Im Zuge einer Voranalyse der Schwingungsmessung zur Sensorwahl wurde in ANSYS ein einfaches Shell (Shell 281) Modell der Zwischendecke eines Blocks nachgebildet um darauf eine Modalanalyse durchzuführen. In Abbildung 46 sind die ersten vier identifizierten Eigenmoden der Struktur dargestellt.

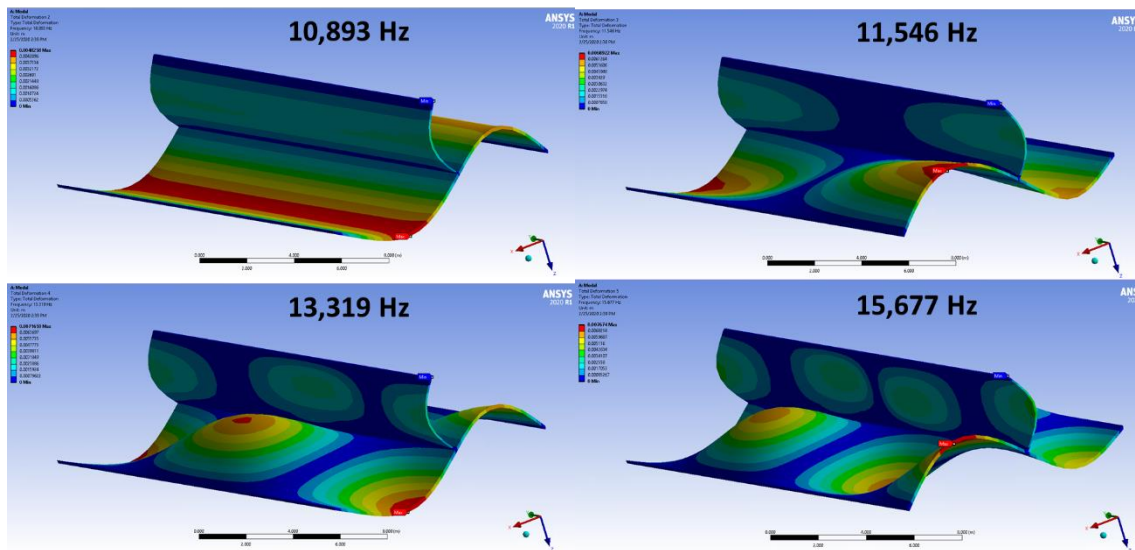


Abbildung 46: Modellierung der ersten vier Eigenmoden.

Im Vergleich mit der schnellen Fourier-Transformation (FFT) der Messung (siehe Abbildung 47) kann hier festgestellt werden, dass Simulation und Messung grundsätzlich gut übereinstimmen, allerdings wäre durch Anpassung der Lagerungsbedingungen, diese wurden im Modell als frei drehbar modelliert, bzw. des E-Moduls eine noch bessere Übereinstimmung zu erwarten. Da dies aber nicht Inhalt des Projekts war, wurden hier keine weiteren Untersuchungen unternommen.

In der Messung ist nun also die erste Eigenmode bei ca. 9,3 Hz, die zweite liegt bei ca. 10,8 Hz und die dritte bei ca. 12,9 Hz.

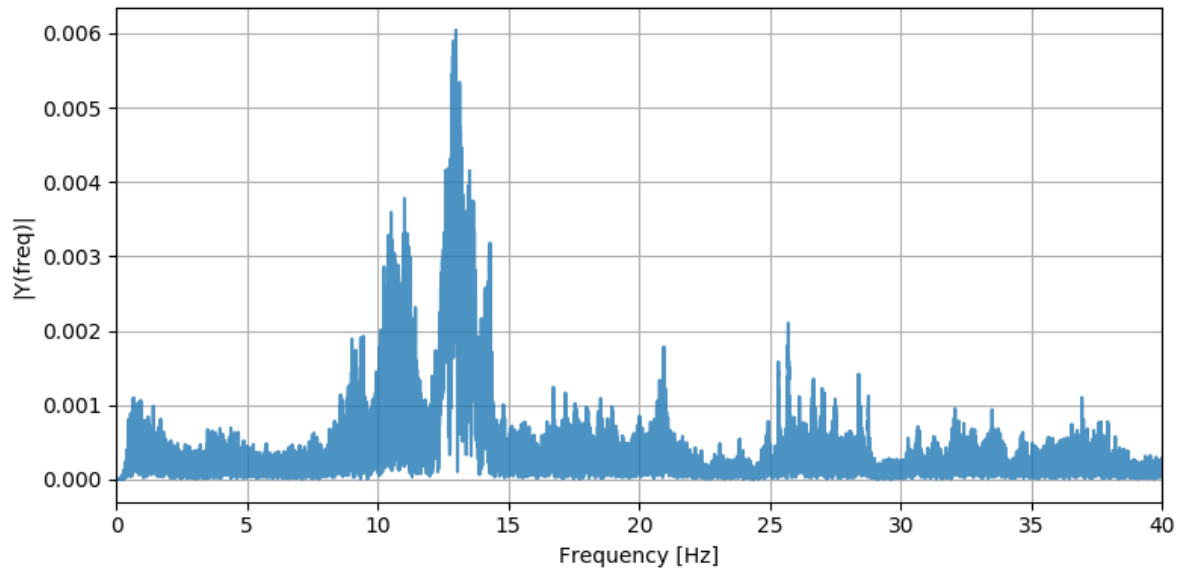
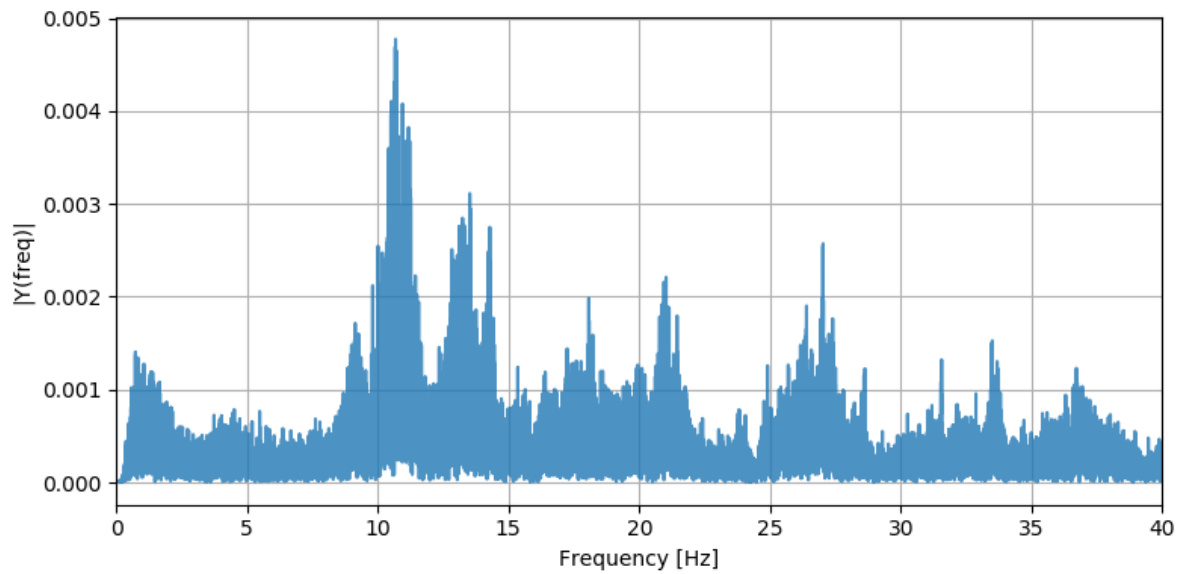


Abbildung 47: Schnelle Fourier-Transformation (FFT) des Schwinggeschwindigkeitssignals vom 3. März von 14:00 bis 14:10 (oben) bzw. vom 7. März von 6:00 bis 6:10 (unten).

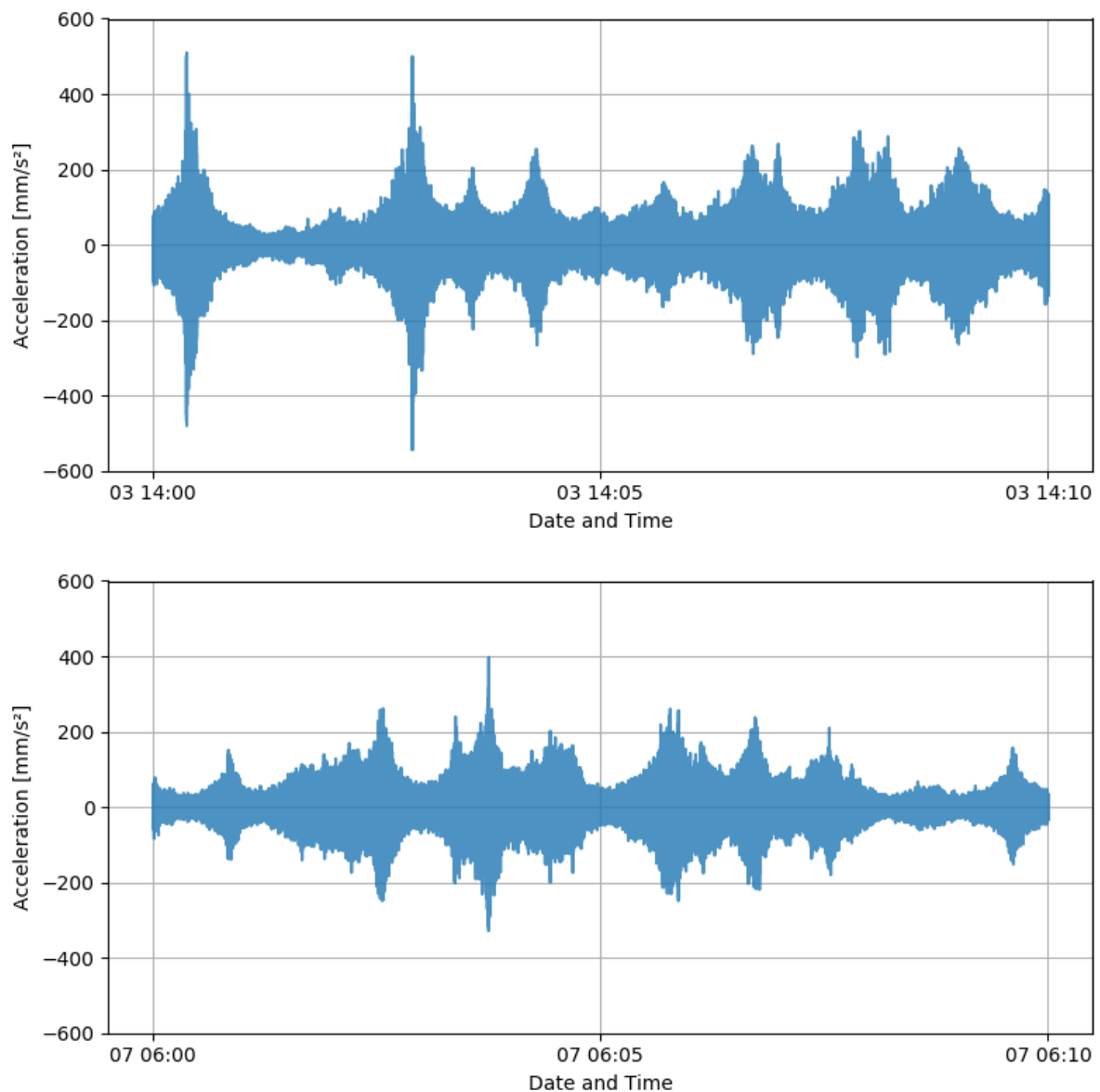


Abbildung 48: Aus zehn Minuten Schwingungsgeschwindigkeitsaufzeichnung berechnete Beschleunigungen vom 3. März von 14:00 bis 14:10 (oben) bzw. vom 7. März von 6:00 bis 6:10 (unten).

Der Vollständigkeit halber wurden aus den Geschwindigkeitssignalen auch Beschleunigungen abgeleitet. Hier bewegen sich die Messwerte üblicherweise unter 600 mm/s^2 . Nach der auf Hochbauten ausgerichteten ÖNORM S9012 stellen also stark bis sehr stark spürbare Werte keine Seltenheit dar.

1.4.4 Rissweitenbestimmung aus DFOS

Da es in dem betrachteten Zeitraum zu keiner bedeutenden Temperaturänderung kam, lässt diese Messung eine Beurteilung der temperaturunabhängigen Langzeitstabilität zu. Aus diesem Grunde wurden hier speziell wiederum die Vergleichbarkeit der installierten Messsysteme (OS, WS, FOS) durchgeführt.

Der Verlauf der Rissweiten über den Zeitraum der Dauermessung ist in Abbildung 49 links dargestellt. Es sind kaum Rissbewegungen vorhanden.

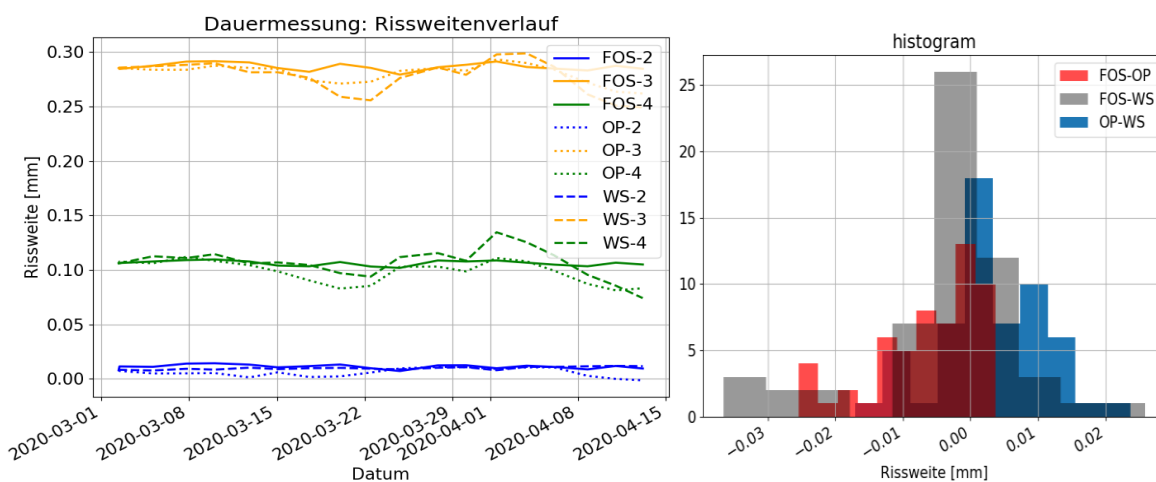


Abbildung 49 Links: Verlauf der Rissweiten während der Dauermessung an der Vergleichsstelle; rechts: Histogramm der Differenzen zwischen verwendeten Sensoren

Als Basis für die Auswertung bezüglich der Genauigkeit der verwendenden Messsysteme wurden die Differenzen der einzelnen Messsysteme als ein Histogramm in Bezug auf Rissweiten erstellt (Abbildung 49 rechts). Für eine bessere visuelle Vergleichbarkeit wurden die Messsignale der konventionellen Messung im gesamten betrachteten Zeitraum parallel verschoben, sodass alle Anfangswerte am Beginn der Dauermessung gleich sind.

In der Tabelle 3 sind wiederum die statistischen Auswertungen zusammengefasst. Die Unterschiede zwischen konventioneller Messung und aus der Dehnungssignalen berechneten Rissweiten sind sehr klein, was bei allen Systemen auf eine gute zeitliche Stabilität schließen lässt.

Tabelle 3 Vergleich der verschiedenen Messsysteme aus der Dauermessung in mm

	Std. Abweichung	Mittelwert - absolut	Maximale Abweichung
WS - OP	0.0078	0.0064	0.0237
FOS - OP	0.0076	0.0070	0.0254
FOS - WS	0.0117	0.0074	0.0365

2 HINWEISE UND EMPFEHLUNGEN ZUR IMPLEMENTIERUNG DES DFOS-MONITORINGS HINTER VERKLEIDUNGEN

2.1 Einleitung

In diesem Abschnitt werden die im Rahmen dieses Projektes gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst, die unmittelbar bei einer praktischen Umsetzung des behandelten DFOS-Monitoringsystems an unbewehrten Tunnelinnenschalen zu beachten sind, wenn dieses den Verlust der konventionellen Inspizierbarkeit aufgrund nachträglicher Verkleidungen kompensieren soll. Die Auswahl, die Einsatzmöglichkeiten, die erforderlichen Rahmenbedingungen sowie die Aussagekraft des Monitoring Systems werden zusammenfassend erläutert.

2.2 Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Rissüberwachung

i. Wie groß ist die Genauigkeit der erkannten Rissbreitenänderung?

Unter optimalen Bedingungen beträgt die erwartbare Genauigkeit 0,05- 0,1 mm. Die Genauigkeit wird bei abnehmendem Kreuzungswinkel zwischen Riss und Faser zunächst unterschätzt. Insgesamt kann bei Kreuzungswinkeln von 70-90° von einer Genauigkeit von <0,15 mm ausgegangen werden.

ii. Wie ist die Aussagekraft zur Rissorientierung gegenüber der Faserrichtung?

Bis ca. 60° Kreuzungswinkel zwischen Faser und Rissverlauf ist keine Aussage möglich. Bei spitzeren Winkeln unter 60° kann aufgrund von Signalrauschen indirekt auf spitze Winkel geschlossen werden, jedoch nur qualitativ und ohne Aussage zum Winkelmaß. Das Messrauschen tritt erst bei größeren Rissbewegungen ($\Delta W_R > 0,60$ mm).

iii. Wie genau ist eine Aussage zu einer zwischen zwei Messepochen aufgetretenen maximalen Rissöffnung möglich?

Dies hängt vom gewählten Fasertyp ab. Bei der im gegenständlichen Projekt verwendeten Faser ist ein Rückschluss auf die maximale Rissöffnung ab einer Mindestrissweite bzw. Änderung von mindestens 0,3 bis 0,4 mm nach Applikation der Faser möglich.

Ab dieser Weite konnte für epochale Messungen im Labor die maximale Rissweitenänderung auf 0,1 mm genau ermittelt werden. In situ beträgt die erwartete Genauigkeit der epochalen Rissweitenänderung ca. 0,2 mm.

Beispiel 1:

- Applikation/Nullmessung: kein Riss vorhanden
- Messung Epoche n: Rissbreite real 0,6 mm
- Riss öffnet sich nach Messung Epoche n real auf 0,9 mm, schließt sich dann wieder auf real 0,6 mm
- Messung Epoche n: Rissbreite 0,6 mm; es wird erkannt, dass zwischenzeitlich der Riss sich auf 0,9+/-0,2 mm, also auf 0,7...1,1 mm geöffnet hat.

Beispiel 2:

- Applikation/Nullmessung: Riss real mit 0,2 mm vorhanden
- Messung Epoche n: Rissbreite 0,2 mm
- Riss öffnet sich nach Messung Epoche n um +0,2 mm auf absolut 0,4 mm, schließt sich dann wieder auf absolut 0,3 mm (jeweils real)
- Messung Epoche n: Rissbreite 0,3 mm; es kann nicht eindeutig erkannt werden, dass sich der Riss zwischenzeitlich/zeitweise auf absolut 0,4 mm geöffnet hatte, da das Delta von 0,2 mm kleiner als das Mindestdelta von 0,3 mm ist. Die neue gemessene absolute Rissbreite von 0,3 mm ist unter optimalen Bedingungen auf +/-0,05 mm genau bestimmbar.

iv. *Wie früh bzw. ab welcher Rissbreite wird ein sich neu entwickelnder Riss feststellbar?*

Eine Rissdetektion ist je nach verwendeter Faser ab einer Rissweite von 0,01 mm technisch möglich (entspricht typischerweise 150- 300 μ S). Eine automatische Bestimmung der Rissweite ist bei optimalen Bedingungen (70-90° Kreuzungswinkel, kein Rissversatz etc.) ab einem Grenzwert ca. 0,05 mm möglich.

v. *Wie genau kann eine Rissänderung, die entlang einer Faser detektiert wird, räumlich verortet werden?*

Vorausgesetzt, dass der Faserverlauf bei Applikation vermessen bzw. in einem lokalen Koordinatensystem referenziert wird, ist eine räumliche Verortung eines Messsignals mit einer Genauigkeit von 2-3 cm möglich.

- vi. *Welche Einschränkungen in der Genauigkeit/Aussagekraft sind zu erwarten bei der Überwachung von Rissen, die bei Applikation der Fasern bereits vorhanden sind, v.a. hinsichtlich des Schließens von Rissen z.B. zufolge abnehmender Temperaturen (somit Stauchen oder Ausknicken gegenüber Applikation)?*

Im Labor konnten Stauchungen bis 0,6 mm ohne Einschränkungen und mit gleichbleibender Genauigkeit gemessen werden. Im Feldversuch im Tauerntunnel fand die Applikation im Sommer statt (geringste Rissöffnung), damit konnte dieser Fall in-situ dort nicht in dieser Größe beobachtet werden. Die Stauchungen waren hier <0,1 mm. Langzeiterfahrungen bei zyklischem Rissatmen müssen erst gesammelt werden. Es empfiehlt sich daher, die Messfasern möglichst zu einem Zeitpunkt mit geringer Rissöffnung zu applizieren (z.B. Sommermonate).

- vii. *Können Rissversätze (Schubrisse mit Versatz normal zur Bauteiloberfläche) detektiert werden und wenn ja in welcher Genauigkeit/mit welcher Aussagekraft?*

Aufgrund fehlender Messdaten sind dazu keine zuverlässigen Aussagen möglich, da weder in den Laborversuchen noch im in-situ-Versuch am Tauerntunnel Versätze beobachtet wurden. Voraussichtlich wird sich ein ähnliches Verhalten wie bei sehr spitzen Kreuzungswinkeln (<45°) einstellen (verraushtes Signal). Somit ist grundsätzlich möglich, dass eine Rissbildung detektiert wird. Ob sich ein neuer Versatz ausbildet ist ggf. nur möglich, wenn der Riss bei Nullmessung bereits bekannt war. Aussagen zum Ausmaß des Versatzes sind nach heutigem Kenntnisstand nicht möglich.

- viii. *Ist eine Überwachung von Blockfugen möglich?*

Blockfugen unbewehrter Innenschalen werden in Österreich üblicherweise als Pressfugen mit mehreren Zentimeter großen Trapezleistenabfasungen/-ausparungen ausgebildet. Um eine Bewegung oder Öffnung einer Blockfuge zu beobachten, müsste diese lokal zugespachtelt werden oder eine freigespannte Faser mit punktueller Fixierung beiderseits der Fuge angebracht werden (und entsprechend geschützt werden).

Bei Einsatz einer Verspachtelung ist zu beachten, dass sich diese bei sich schließenden Blockfugen ggf. Schaden nimmt bzw. auch die Bewegungsfreiheit der Fuge lokal eingeschränkt wird.

Blockfugenabplatzungen zeichnen sich durch fugennahe (sub-)parallele Risse ab. Sie sind daher durch längslaufende Messfasern zu detektieren, welche möglichst nahe an die Fuge heranzuführen sind. Wenn die Rissbildung sehr nahe an der Blockfuge (Größenordnung 5 cm) entsteht, kann diese durch die Faser voraussichtlich nicht detektiert werden, wenn die Faser im selben Block wieder zurückgeführt wird. Bei fugenkreuzender Faserführung müssen erst Erfahrungen gesammelt werden, ob und wie Messsignale bei Bewegungen in der Fuge bei gleichzeitiger fugennaher Rissbildung ausgewertet werden können.

ix. *Kann ein Ablösen des Klebers als solches erkannt werden bzw. besteht die Gefahr einer Fehlinterpretation als Riss in diesem Fall?*

Dafür sind keine Messdaten vorhanden bzw. müssen dazu erst Langzeiterfahrungen gesammelt werden. Vermutlich wird das Ablösen des Klebers nicht singular in der Größenordnung einer üblichen Rissbreite, sondern mit größerer Längserstreckung (cm-Bereich) stattfinden. Dies würde ein deutlich andersartiges Dehnungssignal, welches gut von einer tatsächlichen Rissentwicklungen zu unterscheiden wäre, zur Folge haben.

x. *Wie sehr beeinflusst die Temperatur die Messgenauigkeit?*

Bei korrekt durchgeführter Temperaturkompensation des Messsignals ist der Einfluss für den gegenständlichen Einsatz vernachlässigbar. Räumliche Temperaturschwankungen entlang eines Faserverlaufs (z.B. wenn die Faser sich sowohl über Fahrraum, als auch Zu- und Abluftkanal erstreckt und dort jeweils signifikant unterschiedliche Bauteiltemperaturen herrschen) erschweren die Temperaturkompensation. Im Zuge der Messbeobachtung der beiden Blöcke im Tauerntunnel sind oberflächlich Temperaturunterschiede von $\pm 2^{\circ}\text{C}$ aufgetreten.

- xi. Wenn einmal eine Faser – aus welchem Grund auch immer – reißt, kann dann das Kabel wieder verbunden/gespleißt werden, sodass die restliche Faserlänge noch überwacht werden kann? Oder ist dann die gesamte Faser verloren?*

Durchgehend verklebte Messstrecken können nicht repariert werden. Sinnvollerweise werden beide Faserenden mit Ansteckbuchsen in die Anschlussboxen geführt, sodass eine Faser stets von beiden Seiten her gemessen werden kann. Auch im Falle eines Faserrisses kann dann jeweils bis zum Bruch weiterhin gemessen werden.

In besonders kritischen Fällen mit erwarteten sehr aktiven großen Rissbewegungen kann es sinnvoll sein, abschnittsweise zu verkleben und dazwischen Stecker oder Leerschleifen anzuordnen, um an diesen Stellen mit dem Messgerät im Bedarfsfall neu anschließen zu können.

2.3 Installation der Messeinrichtungen

- xii. Welche Tunnellänge (wie viele Blöcke) können sinnvollerweise in einem Messabschnitt zusammengefasst werden?*

Begrenzend wirkt hier die abnehmende örtliche Messauflösung (räumliche Verortung der Messsignale) der mit zunehmender Messdistanz. Bei Dauermessungen sind mit Einschränkungen in der örtlichen Messauflösung Messdistanzen in einer Faser bis zu 2 km möglich

Bei den üblicherweise zu erwartenden epochalen Messungen sollte eine Messdistanz von 70 m eingehalten werden. Dies bedeutet, dass bei üblichen Regelquerschnittsgrößen je nach Messlayout und Schleifenführung alle 1-2 Blöcke eine Anschlussbox erforderlich ist.

- xiii. Wie klein sind die Mindestbiegeradien der verklebten Fasern?*

Die Fasern sollten mit Biegeradien von mind. 10-15cm verklebt werden.

xiv. *Können Fasern auch gekreuzt werden?*

Ja. Es ist dabei jedoch zu berücksichtigen, dass sich die Aufbauhöhe im Kreuzungspunkt erhöht (von sonst 5 mm auf rd. 7 mm). Dies ist bei der späteren Montage der Verkleidung zu berücksichtigen, v.a. damit es zu keinem Einklemmen der erhabeneren Faser und somit zu einem nicht näher definierten Störsignal oder gar einer Beschädigung der Fasern kommt.

Im unmittelbaren Kreuzungsbereich kann nur die direkt am Bauwerk verklebte Faser zur Rissdetektion herangezogen werden.

xv. *Wie müssen die Steckverbindungen an den Faserenden, die an den Interrogator angeschlossen werden, verwahrt/geschützt werden?*

Die faseroptischen Stecker an den Faserenden müssen in Schutzboxen sicher vor Verschmutzung und Feuchtigkeit verwahrt werden. Diese können auf Putz an der Ulme montiert werden und sind aufgrund der geringen Abmessungen (weniger Zentimeter) in der Regel nicht lichtraumeinschränkend.

Eine Montage unter 2 m über Fahrbahn/Randweg und auf gleichbleibender Seite erleichtert die epochale Messdurchführung. Bei Vorhandensein einer Zwischendecke ist die Installation und Erreichbarkeit der Boxen zur Messdurchführung ohne Verkehrsbeeinträchtigung anlagenspezifisch zu beurteilen.

xvi. *Welche Komponenten/Teile verbleiben außer den Fasern dauerhaft im Tunnel?*

Für ein epochales Monitoring verbleiben lediglich die Anschlussboxen im Tunnel. Bei einer Dauermessung muss ein sicherer, entsprechend vor dem Verkehr geschützter Aufstellort für das Messgerät (Interrogator) und die Geräte zur Datenvorprozessierung und -speicherung gewählt werden.

- xvii. *Welche Einschränkungen bei der Applikation sind zu erwarten bei Rissen, die bereits vorhanden sind, z.B. hinsichtlich des Aufklebens der Fasern?*

Eine Applikation sollte möglichst im Sommerhalbjahr erfolgen, wenn die temperaturbedingte Rissöffnung am geringsten ist. Ablagerungen (z.B. Aussinterungen) an der Bauteiloberfläche sind vor Applikation zu entfernen und die Oberfläche zu reinigen und ggf. zu egalisieren/entgraten.

- xviii. *Was kann über die Dauerhaftigkeit der Haftung des Klebers bisher gesagt werden?*

Die Dauerhaftigkeit des Klebers hängt von der Sorgfältigkeit bei der Verarbeitung und der Einhaltung der produktspezifischen Verarbeitungsrichtlinien (Reinigung Untergrund, Taupunkttemperatur) ab.

Anwendungen mit DFOS an realen Tunnelbauwerken werden erst seit relativ kurzer Zeit getestet. Bei der Untersuchung von nachträglich geklebten Fasern im Plabutschunnel konnten in der realen portalnahen Tunnelumgebung keine Probleme im Messzeitraum von einigen Monaten festgestellt werden. Ebenso konnten im Tauerntunnel im Bereich einer Feuchtstelle keine Auffälligkeiten im Signal nach über einem Jahr Messzeitraum festgestellt werden.

Langjährige Erfahrungen mit verklebten Fasern über Zeiträume, welche eine Vielzahl saisonaler Frostzyklen umfassen, müssen jedoch erst gesammelt werden. Die Erfahrungen dem Einsatz von Epoxidharzstoffen an Verkehrsbauwerken und aus Langzeitversuchen im Zusammenhang mit Bauteilverstärkungen lassen jedoch darauf schließen, dass bei sorgfältiger Verarbeitung spätere Feuchtigkeit bei nicht besonders aggressivem Chemismus die Dauerhaftigkeit des Klebers nicht nennenswert beeinflussen.

Die Dauerhaftigkeit der Verklebung dürfte zumindest in der Größenordnung der Lebensdauer der Verkleidungen (Lärmschutzpaneele, Brandschutzplatten: 25-30 Jahre), hinter denen das Monitoring installiert wird, liegen.

- xix. *Wie lauten die Empfehlungen zur Vorbereitung der Betonoberfläche vor dem Kleberauftrag*

Die herstellerepezifischen Verarbeitungsrichtlinien sind jedenfalls zu beachten. Die Oberfläche muss gereinigt, staubfrei, frei von Fetten und Ölen und in der

Regel trocken sein. Altanstriche bzw. bestehende Beschichtungen sollten an der Klebefläche entfernt werden.

- xx. *Ist ein bestimmter Mindestabstand zwischen Fasern und Befestigungselementen der Verkleidungen (Brandschutzplatten oder Lärmschutz) einzuhalten?*

Die Montageplanung der Verkleidung und das Faserlayout sind aufeinander abzustimmen. Es wird ein Mindestabstand von 5 cm zwischen Kleber und Befestigungselementen empfohlen. Zudem ist sicherzustellen, dass die Faser und der Kleber durch die Verkleidung nicht geklemmt werden.

Es wird empfohlen, vor Montage der Verkleidung zunächst eine Nullmessung der Faseroptik durchzuführen und nach Montage der Verkleidung eine Kontrollmessung, um allfällige Beschädigungen der Fasern vor Inbetriebnahme des Monitorings zu erkennen.

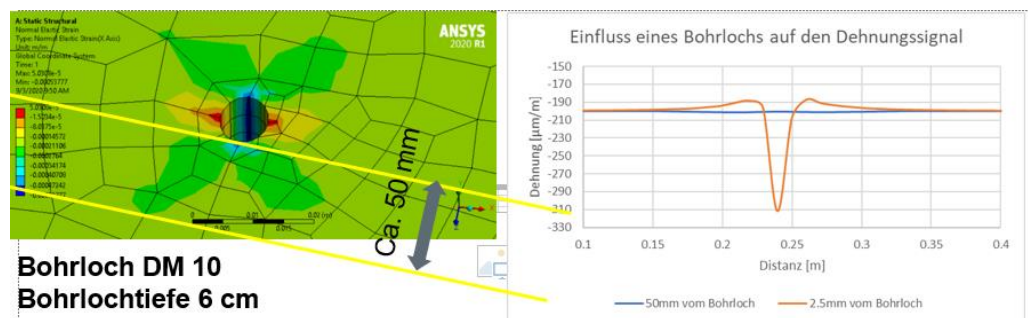


Abbildung 50 Links: Einfluss des Abstandes bei einem Bohrloch auf den Dehnungsverlauf Dehnung verlauf (6 MPa Druckspannung).

2.4 Messdurchführung und -auswertung

- xxi. *Welches sind die messtechnischen Randbedingungen der Anschlusspositionen für den Interrogator?*

Hinsichtlich der Anordnung der Boxen und von Komponenten einer Dauermessung siehe Punkt xv und xvi.

Bei einer Dauermessung ist eine stabile Stromversorgung erforderlich.

- xxii. *Müssen die langjährigen epochalen Folgemessungen immer mit dem identen Interrogator durchgeführt werden? Wenn ja, wie kann diese Abhängigkeit reduziert werden?*

Ja, wenn die epochalen Messungen miteinander zu Messreihen verkettet werden sollen (was im Regelfall zu erwarten ist). Die Abhängigkeit von einem Gerät kann reduziert werden, indem die Nullmessung mit einem zweiten unabhängigen Reservegerät durchgeführt wird. Bei Wechsel zwischen zwei Geräten sollte eine Übergabemessung sowohl mit altem als auch neuem Gerät durchgeführt werden.

- xxiii. *Müssen die Messungen immer bei gleichartigen Temperaturbedingungen stattfinden?*

Nein, wäre aber vorteilhaft bei großen Messintervallen, wenn das Ausmaß einer allfälligen zustandsrelevanten temperaturabhängigen Rissatmung nicht bekannt ist.

- xxiv. *Muss der Verkehr - abgesehen von der Schaffung der physischen Zugänglichkeit – während der Messung angehalten werden, um Erschütterungen auszuschließen?*

Nein, wenn während der Messung ausreichende Phasen mit geringer Vibration vorhanden sind.

Falls im gemessenen Block andere Vibrationsquellen vorhanden sind (z.B. Strahlventilator), sollten diese während der Messung ausgeschalten werden.

- xxv. *Wie lange dauert in etwa eine Einzelmessung z.B: für ein Messfeld im Umfang des Versuchs beim Tauerntunnel (inkl. Aufbau. Anstecken, Messen, Abbau)*

Der Zeitbedarf hängt vor allem von der Zugänglichkeit der Anschlussboxen ab. Die Messung selbst benötigt nur wenige Minuten, ggf. abhängig davon, ob auf die Verkehrsintensität während der Messung Rücksicht genommen werden muss (vgl. Punkt xxiv).

Bei den Rahmenbedingungen analog dem Feldversuch am Tauerntunnel (Messinstallation im Luftkanal) kann von einem Zeitbedarf von rd. zwei Stunden für vier Messlinien ausgegangen werden.

xxvi. Wird die Messung durch im unmittelbaren Nahbereich liegende elektrische Leitungen oder elektromagnetische Felder beeinflusst?

Nein. Das während der Messung an die Fasern angeschlossene Messgerät/der Interrogator sollte jedoch weit genug von einer potenziellen Störquelle entfernt sein.

xxvii. Welches messtechnische Spezial-Know-How ist für die Auswertung der Messung erforderlich? Wie viel Interpretation ist dafür erforderlich? Wie kann die Reproduzierbarkeit sichergestellt werden, wenn die Auswertung nicht von derselben Person oder Organisation durchgeführt wird?

Die Vorprozessierung des Messsignals benötigt Erfahrung. Die Temperaturkompensation muss für jede Installation neu konfiguriert werden. Ab den temperaturkompensierten Dehnungen ist die Auswertung mit beliebiger Programmiersprache bzw. beliebigen Algorithmen möglich. Eine einfache Auswerte-Software könnte zur Verfügung gestellt werden. Die für die Anwendung der Auswertung notwendige Festlegung der Kriterien/Schwellenwerte zur Rissdetektion und Bestimmung der Rissweiten kann zu den Abweichungen von ca. 5% führen. Bei der Auswertung von epochalen Messreihen ist die Anwendung gleichbleibender Algorithmen über die Zeitreihe empfehlenswert.

xxviii. Ist bei langjährigen Überwachungen die zukünftige Lesbarkeit/Verarbeitbarkeit von Daten/Datenformaten ein Thema?

Alle Daten können in nicht-proprietären Formaten gespeichert werden.

2.5 Empfohlenes Vorgehen bei Implementierung des DFOS-Monitorings

1. Eingehende Inspektion und Bewertung der zu verkleidenden Tunnelinnenschale
2. Entwurf Messlayout/Faserführung
 - Fall A (bei Vorschädigung oder besondere Randbedingungen): Anpassung Layout auf die schon vorhandenen bzw. erwarteten zukünftigen Rissverläufe, ggf. spezifische zusätzliche Messeinrichtungen
 - Fall B: Ohne Vorschädigung: generisches Messlayout z.B. gem. D.4.
3. Abgleich des Messlayouts mit der Montageplanung der Verkleidung
4. Erstellen eines Monitoringplans mit definierten Messintervallen und allfälligen vordefinierten Warn- und Alarmwerten der Rissentwicklung
5. Sicherstellung der zukünftigen Kontinuität des verwendeten Equipments für Messung und Auswertung: v.a. gleichbleibender Interrogator
6. Durchführen allfälliger Instandsetzungsmaßnahmen am überwachten Tragwerk
7. Reinigen der Tragwerksoberfläche und Vorbereiten des Betonuntergrundes für das Verkleben der Messfasern (inkl. Entfernung Altbeschichtung).
8. Verkleben der Messfasern gem. produktspezifischer Verarbeitungsrichtlinien (u.a. Taupunkt beachten)
9. Einmessung und Stationierung des Faserverlaufs in einem lokalen Koordinatensystem, Stationierung von allfällig bereits vorhandenen Rissen
10. Nullmessung und gleichzeitige Referenzmessung allfällig vorhandener Risse
11. Montage der Verkleidung
12. Kontrollmessung nach Abschluss der Montagearbeiten
13. Folgemessung gem. Monitoringplan und Auswertung sowie tunnelstatische Interpretation
14. ggf. Fortschreibung des Monitoringplans

3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

3.1 Schlussfolgerungen

Die Anwendbarkeit des im Zuge der Laborversuche untersuchten faseroptischen Rissmonitoring-Systems konnte auch unter realen Bedingungen im Tauerntunnel verifiziert werden. Es zeigte sich dabei, dass mittels des faseroptischen Messsystems auch Risse detektiert werden können, welche durch eine Begehung aufgrund der schlechten Lichtverhältnisse nicht augenscheinlich ersichtlich waren. Durch das tachymetrische Einmessen des Faserlaufs und der Verortung vor Ort, war eine Zuordnung der im Signal auftretenden Dehnungspeaks zu den an der Tunnelinnenschale visuell identifizierten Risspositionen auf wenige Zentimeter möglich. Dies ermöglicht es, beim Auftreten unbekannter Dehnungspeaks diese vor Ort rückzustecken und an diesen Positionen gezielt auf Risse zu inspizieren, wie dies im Zuge dieses Projektes auch durchgeführt wurde. Die temperaturabhängigen Rissbewegungen konnten mittels der faseroptischen Messungen erfasst werden, wobei die Risse ein unterschiedliches Verhalten aufweisen. Sogar die mehrmalige Kreuzung desselben Risses ergab ein unterschiedliches Dehnungsverhalten an den Kreuzungspunkten.

Die Auswertung der Rissweitemessung ergab, dass während des Messzeitraums von mehr als einem Jahr geringe Rissbewegungen aufgetreten sind. Das Maximum lag bei ca. $\Delta w_{\max} = 0,3$ mm. Der Algorithmus zur automatischen Rissweitemessung wurde erfolgreich implementiert. Die Risse werden als solche erkannt und entsprechend der Verortung räumlich zugeordnet. Die Rissweiten folgen wie Dehnungen dem Temperaturjahresgang und öffnen sich im Winter und haben sich nahezu im Sommer alle wieder geschlossen bzw. den Ausgangszustand erreicht. Die Gegenüberstellung mit dem konventionellen Messsystemen ergab, dass mit verteilten optischen Fasermessungen Abweichungen in ähnlich guter Genauigkeit erzielt werden können, wobei hier Einschränkungen bestehen. Die optischen Distanzsensoren messen die Projektion, während die Mechanik der Seilzugwegeber, welche ähnlich den Fasern direkt an der Oberfläche befestigt sind, temperaturbedingten Einflüsse unterliegen. Lokale Unterschiede verschiedener Messsysteme traten in der Epochenmessung in der Größenordnung von maximal $\pm 0,15$ mm auf. Die Dauermessung von über einem Monat zeigte ebenfalls eine gute zeitliche Stabilität des Messsystems.

Des Weiteren zeigte sich auch, dass die im Tunnel aufgrund des Verkehrs auftretenden Vibrationen ein Verrauschen der Messungen zur Folge haben können.

Die Messung selbst sollte möglichst ohne besondere Vibrationen (beachte z.B. Verkehr, Lüfter am gemessenen Block), durchgeführt werden. Störsignale wurden aber in der Regel

als solche im Zuge der Messung aber sofort als solche erkannt. Da jedoch während der Messungen ausreichend lange Fenster ohne Vibrationen vorhanden sind, wird die Qualität der Ergebnisse dadurch nicht beeinflusst.

Hinsichtlich der Qualität der Messungen und Ergebnisse ist dabei vor allen Dingen die Vorbereitung des Untergrundes (Abschleifen der Grate und Absaugen) besonders wichtig, so dass die Verbindung der Messfaser mit der Tunneloberfläche und damit eine optimale Übertragung der Dehnungen des Objektes auf die Messfaser gewährleistet werden kann. Auch sollten die Messfasern in den Sommermonaten appliziert werden, um so die temperaturbedingten Bewegungen besser erfassen zu können. Stauchungen können jedoch auch in begrenztem Umfang erfasst werden.

Die Vorprozessierung und Auswertung erfordern Erfahrung. Darüber hinaus sind Kontinuität und Vergleichbarkeit der Messdurchführung und –auswertung wichtig. So sollten die Messung stets mit dem gleichem Interrogator durchgeführt werden, aber auch die Temperaturkompensation bei jeder Messung konfiguriert werden. Bei jeder Folgemessung sollten möglichst gleiche Auswertalgorithmen / -software verwendet werden.

Nach heutigem Kenntnisstand wird als Inspektionsintervall ein Messgrundintervall von zwei Jahren empfohlen Messung alle 2a (siehe D 4), z.B. im Rahmen der Tunnelkontrolle/prüfung und Tunnelwäsche. Der Zeitbedarf für eine Messdurchführung einer Epochenmessung betrug im Zuge der Messungen im Tauerntunnel ca. 2h für die 4 Messlinien.

3.2 Ausblick und Entwicklungsbedarf

Die Untersuchungen im Rahmen von RIBET konnte zeigen, dass die heute verfügbare verteilte optische Fasermessung (DFOS-Technologie) geeignet ist, die Entstehung neuer Risse zu erkennen, und deren weitere Entwicklung zu überwachen. Es ist möglich eine durch Verkleidungen verhinderte herkömmliche visuellen Inspektion zumindest teilweise zu kompensieren und ein Lagebild über die verdeckte unbewehrte Innenschale zu entwickeln.

Für die praktische Umsetzung eines realen Langzeit-Monitorings müssen jedoch noch Erfahrungen gesammelt werden, um die Zuverlässigkeit und Treffsicherheit der Rissüberwachung abzusichern. Dies betrifft u.a. das Sammeln von Langzeiterfahrungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Verklebung unter den typischen vorherrschenden Umweltbedingungen (Temperaturwechsel, Feuchtigkeit, chemisches Milieu) und unter wechselnden oder zyklischen Dehnungszuständen, aber auch die praktische Erfahrung in der Interpretation und Deutung der Messsignale über einen Zeitraum von mehreren Jahren in Bezug auf die Entwicklung des Schalenzustands. Genauere Untersuchungen von Bewegungen, welche

nicht in Faserrichtung verlaufen, wie Rissversatz (Out of Plane), Schubverformungen oder spitze Kreuzungswinkel zwischen Faser und Riss sollten zukünftig noch im Zuge von Laborversuchen noch eingehender untersucht werden, um somit die Interpretation der auftretenden Tragwerksreaktion der Tunnelschale weiter zu entwickeln.

Hinsichtlich der Zuverlässigkeit einer Bauwerksüberwachung ist qualitativ ableitbar, dass diese für die gegenständliche DFOS-Methode die Lücke zwischen herkömmlicher visueller Inspektion und einer durch die Verkleidung eingeschränkten Inspektion zu schließen vermag. Eine quantitative Beurteilung der Zuverlässigkeit der Bauwerksüberwachung mittels DFOS kann nur anhand einer großen Stichprobengröße bzw. im Einzelfall anhand spezifischer bekannter Versagensmechanismen und -verläufe und Randbedingungen erfolgen. Dazu fehlt es noch an Erkenntnissen für die Streuung des Erfassungssystems „DFOS“ als längerfristiges in-situ Rissmonitoring. Es wird daher empfohlen, die Messtelle im Tauern-tunnel jedenfalls weiter betrieben werden. Mit weiteren Pilotanwendungen und entsprechender Auswertung könnte hier noch zusätzlich eine Erfahrungsgrundlage geschaffen werden.

Es ist auch zu empfehlen, das Gesamtsystem (also mit montierter Brandschutzverkleidung) im Labor analog den hier durchgeführten Versuchen zu untersuchen, um auch hier allfällige weitere Einflüsse im Verhalten des Gesamtsystems zu verifizieren.

Eine Herausforderung stellt die Interpretation von Rissbildern aus Punktwolken gemessener und ggf. vorgefilterter Strainpeaks entlang des Fasersystems dar. Vor allem dann, wenn das Rissbild nicht bekannt ist. Hier wird stets eine sachverständige tunnelstatische Beurteilung erforderlich sein. Langfristig ist auch ein unterstützender Einsatz von Künstlicher Intelligenz, denkbar, welche auf Basis umfassender vorhandener, digital aufbereiteter Tunnel-scandaten bzw. digitaler Risskartierungen angelehrt werden könnte, um aus den Punktwolken wahrscheinliche Rissbilder zu entwickeln und weniger wahrscheinliche oder gar unrealistische Rissbildinterpretationen auszufiltern.

Der im Rahmen von RIBET erstellte Risskatalog (vgl. Deliverable D.2) liefert für derlei automationsunterstützte Auswertungen eine notwendige Grundlage.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] ÖSTERREICHISCHE BAUTECHNIK VEREINIGUNG, ÖBV-Richtlinie „Innenschalenbeton“, Wien, 2012.
- [2] PÖTTLER, R.: Die unbewehrte Innenschale im Felstunnelbau – Standsicherheit und Verformung im Rissbereich. Beton- und Stahlbetonbau 88 (1993), Heft 6. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1993
- [3] SAURER, E.; HÖSER, S.; MATTLE, B.: Ein Bemessungskonzept für unbewehrte und faserbewehrte Tunnelinnenschalen. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), Heft 6. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2011
- [4] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR UNTERIRDISCHES BAUEN E.V.: „Empfehlungen zu Ausführung und Einsatz unbewehrter Tunnelinnenschalen“, Köln, 2007.
- [5] LUNA (2014A), DATA SHEET: OPTICAL BACKSCATTER REFLECTOMETER (MODEL OBR 4600). VER. LTOBR4600 REV. 004 02/13/2014, LUNA TECHNOLOGIES INC., ROANOKE, USA, 2014
- [6] PENGG KABEL GMBH: GLASFASERKABEL. KONFEKTIONIERBARE KABEL I-V (S. 64). ÖSTERREICH, 2017