

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Author's Postprint

Heidenreich, Fabian; Herten, Markus; Hofmann, Detef; Basedau, Frank Verwendung faseroptischer Messtechnik im Zuge wiederholter Eignungsprüfungen an Verpressankern

Mitteilung des Instituts für Geomechanik und Geotechnik - Technische Universität
Braunschweig

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108937>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Heidenreich, Fabian; Herten, Markus; Hofmann, Detef; Basedau, Frank (2020): Verwendung faseroptischer Messtechnik im Zuge wiederholter Eignungsprüfungen an Verpressankern. In: Stahlmann, Joachim (Hg.): Messen in der Geotechnik 2020: Fachseminar am 20./21. Februar 2020. Mitteilung des Instituts für Geomechanik und Geotechnik - Technische Universität Braunschweig. Braunschweig: TU Braunschweig, Institut für Geomechanik und Geotechnik. S. 297-323.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Erstveröffentlichung in Stahlmann, Joachim (Hg.) (2020): Messen in der Geotechnik 2020. Fachseminar: 20./21. Februar 2020. Mitteilung des Instituts für Geomechanik und Geotechnik, Heft Nr. 110. Braunschweig: IGG TUBS, S. 297-323.

Verwendung faseroptischer Messtechnik im Zuge wiederholter Eignungsprüfungen an Verpressankern

Fabian Heidenreich^a, Markus Herten^a, Detlef Hofmann^b, Frank Basedau^b

^a Bundesanstalt für Wasserbau, Deutschland

^b Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Deutschland

1 Einleitung

Der Bedarf und Anspruch an begleitende und dauerhafte Monitoringmaßnahmen während der Bauausführung und der Lebensdauer der Bauwerke steigt mit deren zunehmender Komplexität immer weiter an. Geotechnische Elemente, wie Verpressanker und Mikropfähle, lassen sich aufgrund ihrer Herstellung und Lage im Boden nur mit hohem Aufwand mit Messtechnik ausstatten. Gängige Methoden zur Überwachung sind Kraftmessdosen am Kopf sowie Dehnungsmessstreifen oder Schwingsaitenaufnehmer zur punktuellen Überprüfung von Verformungen am Stahlglied. In den letzten Jahren wird der Einsatz von Glasfasermesstechnik bei Eignungs- und Untersuchungsprüfungen von Verpressankern verstärkt praktiziert [HERTEN & SCHWAB 2009, HUYBRECHTS et al, 2016; KINDLER et al, 2017; FABRIS et al, 2019].

An der Nordstrecke des Dortmund-Ems-Kanals (DEK) zwischen Bergeshövede und Gleesen werden alle Schleusen an die wachsenden Abmessungen der Binnenschifffahrt angepasst. Eine besondere Herausforderung für die Bauausführung stellte sich im Laufe der Baugrunderkundungskampagnen heraus. An allen geplanten Schleusenstandorten wurde im Grundwasser eine Betonaggressivität infolge kalklösender Kohlensäure festgestellt. Bei Bauelementen wie Verpressankern kann sich ein chemischer Angriff auf den Zementkörper gravierend auf das Tragverhalten auswirken. Bei Modellversuchen an der Ruhr-Universität Bochum [HOF, 2004; TRIANTAFYLIDIS & SCHREINER, 2007] sowie an der MPA Stuttgart [MANN & LANGE, 1993] wurde festgestellt, dass der chemische Angriff durch kalklösende Kohlensäure zu einem Tragfähigkeitsverlust von 20% bis 80% führt.

Für weitere Untersuchungen sind an der Schleuse Gleesen am DEK sechs Forschungsanker installiert worden, die Rückschlüsse auf Änderungen im Tragverhalten in Folge des chemischen Angriffes geben sollen. Zur Überwachung ist eine Kraftmessdose an jedem Ankerkopf angebracht, um die Änderung der Festlegelast über die Dauer zu erfassen. Zusätzlich ist ein Glasfaserkabel an das Riprohr der werksmäßig vorverpressten Anker appliziert, wodurch die Dehnungen des Zementkörpers inklusive der Rissbildung während der Eignungsprüfungen gemessen werden.

Im Zuge der Untersuchungen werden die sechs Verpressanker seit der Erstellung im Jahr 2017 jährlich einer Eignungsprüfung unterzogen. Bei dieser wird die Dehnungsänderung der Glasfaser mit

Hilfe der Rayleigh-Rückstreuung erfasst. Im Folgenden werden die bisherigen Ergebnisse aus den drei Untersuchungen von 2017 bis 2019 dargestellt.

2 Lage und Einbau

2.1 Lage und Einbau der Verpressanker

Die sechs Forschungsanker befinden sich im Uferbereich des Unterwassers der Schleuse Gleesen. An zwei Standorten (Abbildung 1) sind jeweils drei Einstabanker, FA1-3 am Standort A und FA4-6 am Standort B, eingebaut worden. Die Verpresskörper des ersten Standorts befinden sich im Bereich von dicht bis sehr dicht gelagerten Sanden bis hin zu Sanden mit Ton- und Schlufflinsen. Am zweiten Standort stehen im Bereich des Zementkörpers mitteldichte bis sehr dichte Sande und am Fuß Sand mit Ton- und Schlufflinsen an. Alle Anker sind gleich ausgebildet und vertikal eingebaut. Die freie Stahllänge beträgt rund 6,25 m und die Länge des Verpresskörpers liegt bei circa 5,00 m. Der Durchmesser des Zugglieds beträgt 63,5 mm und wird von einem rund 185 mm mächtigen Verpresskörper umhüllt. Bei der Herstellung erfolgten eine Wasserspülung oberhalb der Verpressstrecke und eine Verfüllung mit einer Bentonitsuspension.

2.2 Einbau und Anbringung Messtechnik

Die an der Baustelle angelieferten Einstabanker sind werksseitig bereits innerhalb eines gewellten Hüllrohres mit Zementleim verfüllt und im Bereich der freien Stahllänge mit einem zusätzlichen glatten Hüllrohr versehen (Abbildung 2). Die Glasfaserkabel sind mit speziell angefertigten Abstandshaltern an das Ripprohr angebracht, so dass eine Messung der Dehnungen im Zementkörper erfolgt. Oberhalb des späteren Verpresskörpers verlaufen die Glasfaserkabel entlang des glatten Hüllrohres in Leerrohren, die im Übergang zu der Verpressstrecke zur Vermeidung eines Zutritts des Zementleims



Abbildung 1: Lage der Versuchsanker im Unterwasserbereich der Schleuse Gleesen (Dortmund-Ems-Kanal)

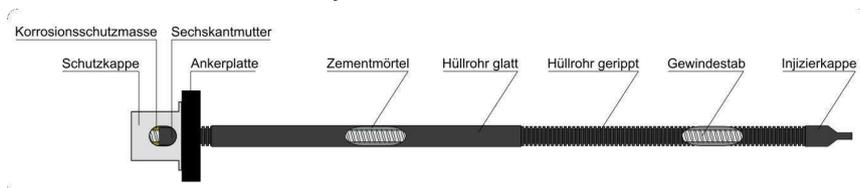


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Einstabankers

abgedichtet wurden (Abbildung 3). Im Fußbereich des Ankers sind die Kabel jeweils als Schleife gelegt, so dass eine Dehnungsmessung an zwei gegenüberliegenden Seiten erfolgen kann (Abbildung 3). Die Messkabel werden seitlich unterhalb des Widerlagers an die Geländeoberkante geführt, um dieses außerhalb der Durchführung des Ankers schadensfrei zu halten. Die Anbringung der Glasfaserkabel auf der Baustelle stellte keine größeren Probleme dar und führte durch ein geeignetes Zeitmanagement zu keinen Verzögerungen.

Die Kraftmessdosen zur dauerhaften Überwachung der Ankerkraft sind zwischen Widerlager und Auflagerplatte des Ankerkopfes installiert (Abbildung 4). Die Datenerfassung erfolgt über einen Logger je Standort, welcher witterungsgeschützt in einem verschließbaren Edelstahlbehälter lagert. Dort werden auch die Anschlussstücke für die Auslesung der Glasfasern hineingeführt.



Abbildung 3: Angebrachte Glasfaserkabel vor dem Einbau des Einstabankers im Übergangsbereich zwischen Ripprrohr und Glattring (links) und im Fußbereich (rechts)



Abbildung 4: Anker FA1 bis FA3 im eingebauten Zustand mit Betonwiderlager, Messstation, Kraftmessdosen (blau) und Schutzkappe (weiß)

3 Faseroptische Sensoren zur Dehnungsmessung

Ein faseroptischer Sensor (FOS) ist ein spezieller Messaufnehmer (Sensor) für optische Messverfahren auf Grundlage von Lichtwellenleitern (LWL). Bei faseroptischen Sensoren wird die Messgröße nicht durch eine elektrische Größe repräsentiert bzw. übertragen, sondern durch eine optische.

3.1 Lichtwellenleiter (LWL)

Ein Lichtwellenleiter besteht aus Glas oder Kunststoff mit geringem Durchmesser und hoher Flexibilität (Abbildung 5). Er dient zur Informationsübertragung mittels optischer Wellen über große Entfernungen mit sehr geringen Verlusten. Das Licht wird in der optischen Faser aufgrund des gegenüber dem Mantel höheren Brechungsindex des optischen Kerns durch Totalreflexion gehalten. Singlemodefasern zeichnen sich durch einen sehr kleinen Kerndurchmesser aus, so dass hier nur eine einzige Lichtmode ausbreitungsfähig ist.

Der Fasermantel wird vom Coating, einer zum Schutz auf dem Glasfasermantel aufgetragenen Kunststoffbeschichtung, umgeben. Zusätzlich sind meist noch eine oder mehrere weitere Hüllen zum Schutz vor äußeren Einflüssen oder bei Sensorfasern zur guten Anbindung an das Messobjekt vorhanden. Die verschiedenen Glasfasertypen unterscheiden sich nach dem Durchmesser von Kern und Mantel in Singlemode- oder Multimodefasern und nach dem Verlauf des Brechungsindexes in Stufenindex- oder Gradientenindexfasern. Für die Fasersensorik kommen hauptsächlich Singlemodefasern zur Anwendung. Gegenüber Stufenindex- oder Gradientenindexfasern bieten diese entscheidende Vorteile, wie z. B. geringe Signaldämpfung, sehr geringe Laufzeitverschiebungen und hohe Bandbreiten. Damit sind große Distanzen zum Messobjekt überbrückbar. Erkauft wird dies mit höheren Anforderungen beim Verbinden der Fasern (Spleißen, Steckverbinder) und der Lichteinkopplung auf Grund des kleinen Kerndurchmessers.

Wesentliche Parameter zur Auswahl des geeigneten Fasersensors sind die Größe der Messbasis sowie Anzahl und Dichte der Messstellen. Lokale faseroptische Sensoren besitzen eine kurze Messbasis (z. B. wenige mm) und werden an definierten diskreten Stellen eingesetzt. Verteilte und quasi-verteilte faseroptische Sensoren kommen dagegen für Messungen über teilweise sehr große Strecken mittels einer einzelnen Faser zum Einsatz.

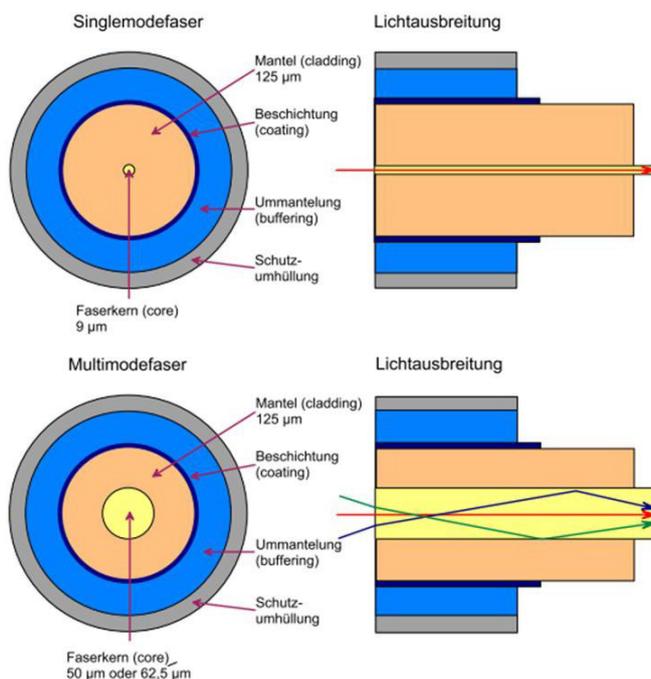


Abbildung 5: Unterschiede im Aufbau und in der Lichtausbreitung von Singlemode- und Multimodefasern

3.2 Lokale (punktuelle) Fasersensoren

Zu den bekanntesten und am häufigsten eingesetzten Fasersensoren gehören Faser-Bragg-Gittersensoren. Sie sind heute einschließlich geeigneter Messgeräte (Interrogatoren) in einer Vielzahl von Ausführungen kommerziell erhältlich.

Ein Faser-Bragg-Gitter (FBG) ist ein in einen Lichtwellenleiter eingeschriebener optischer Interferenzfilter, der durch eine periodische Modulation des Brechungsindex der Faserkernbrechzahl entsteht. Das Gitter reflektiert dabei einen bestimmten Anteil vom optischen Spektrum des einfallenden Lichtes, dessen Wellenlänge direkt von der Periode des Abstands der Gitterebenen abhängt. Ändert sich der Gitterabstand durch eine Dehnung oder Temperaturänderung der Faser, ändert sich ebenfalls die Wellenlänge des reflektierten Lichtes [SCHALLERT et al, 2004; SCHLÜTER, 2010].

Ein besonderer Vorteil der FBG-Sensorik ist, dass viele Sensoren in einer Faser hintereinandergeschaltet und bei simultaner Messung bei Verwendung unterschiedlicher Braggwellenlängen leicht separiert werden können (quasiverteiltes Messsystem). Die Trennung von Temperatur- und Dehnungsbeeinflussung der Bragg-Wellenlänge geschieht meist über Referenzsensoren, die vom Mess-FBG räumlich getrennt sind. Diese räumliche Trennung z. B. durch Hybridsensoren von FBG und langperiodische Gitterstrukturen aufzuheben, gelingt im Labor, findet aber noch keine allgemeine Anwendung in der Messpraxis.

Für die Messung mit Faser-Bragg-Gittern stehen heute eine Vielzahl von FBG-Interrogatoren auf der Grundlage unterschiedlicher Auswerteverfahren mit einer großen Leistungspalette zur Verfügung. Gegenwärtig werden typische Wellenlängenauflösungen von ca. 0,5 pm und Messraten von 1 bis 34 kHz erreicht. Vereinzelt sind Geräte bis >150 kHz erhältlich, dann aber meist mit einer geringeren nativen Wellenlängenauflösung, die durch Interpolationsalgorithmen verbessert werden kann.

Monitoring-Systeme mit Faser-Bragg-Gitter-Sensoren lassen sich langzeitstabil und zuverlässig realisieren. Reparaturen oder Wechsel von Anschluss-LWL, Ergänzung oder Tausch von Sensoren erfordern keine Neukalibrierung des Messgeräts. Ebenso können diese Systeme diskontinuierlich arbeiten, da durch das absolut messende Verfahren kein Nullpunktverlust eintritt.

Nachteil solcher „quasiverteilten“ faseroptischen Messsysteme ist allerdings, dass lediglich punkt- oder abschnittsweise Aussagen zum Verhalten im Verpressbereich der Anker möglich sind. Auftretende Dehnungsüberhöhungen durch z. B. Risse können in der Regel nicht aussagekräftig detektiert werden. Dieser Nachteil wird durch die Verwendung verteilter faseroptischer Messverfahren vermieden. Hierbei dient die Faser selbst als Sensor. Die Messgröße wird kontinuierlich über die gesamte Faserlänge oder, wenn benötigt, über gewählte Abschnitte erfasst. Für die Erfassung schnell fortschreitender Veränderungen wie sie zum Beispiel bei Rissbildung und Rissfortschritt auftreten, sind aber auch kurze Messzeiten notwendig.

3.3 Verteilt messende faseroptische Messsysteme

Zu einer kontinuierlich verteilten Messung von physikalischen Größen (vorwiegend Dehnungs- und Temperaturverläufe) werden verschiedene Lichtstreuungsprozesse (Abbildung 6) in der Faser genutzt. Auf linearen Lichtstreuungsprozessen durch Rayleigh-Streuung basiert die bekannte herkömmliche optische Zeitbereichsreflektometrie, die standardmäßig in der optischen Nachrichtentechnik zur Lokalisierung von Bruchstellen und sonstigen Störungen angewendet wird. Durch die Weiterentwicklung der Lasertechnologie in den letzten Jahren können nichtlineare Lichtstreuungseffekte in Glasfasern erzeugt und genutzt werden. Insbesondere in Monomodefasern sind wegen der kleinen Querschnitte

hohe Leistungsdichten über große Längen erreichbar, die nichtlineare Phänomene wie die stimulierte Raman- und Brillouin-Streuung hervorrufen.

Eine optische Zeitbereichsreflektometrie (Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)) liefert neben einer Längenermittlung (tatsächlich gemessen wird die Laufzeit eines Lichtpulses) den orts aufgelösten Dämpfungsverlauf eines LWL. Das Messprinzip beruht darauf, dass kurze Pulse gesendet werden, die den Prüfling durchlaufen. Beim Durchlaufen der Faser wird von jedem Ort ein kleiner Teil des Lichts auf Grund der Streuprozesse in der Faser zum Gerät zurückgeleitet. Von entfernteren Orten kommt die Streuung also später und um die Faserdämpfung abgeschwächt zum Messgerät zurück.

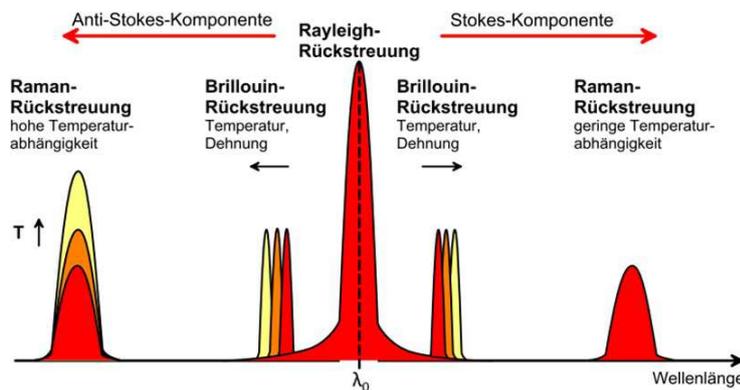


Abbildung 6: Lineare und nichtlineare Lichtstreuungsprozesse in Glasfasern

Die Anzeige des Messgerätes stellt den Intensitätsverlauf über einer Zeitachse dar, wobei die Zeitachse in Entfernung umgerechnet ist. Übliche Ortsauflösungen bei OTDR-Geräten liegen im Zentimeterbereich.

Zu einer höheren Ortsauflösung gelangt man durch Messung im Frequenzbereich bei der Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) unter Verwendung einer durchstimmbaren Lichtquelle und anschließender Rücktransformation des Signals.

3.3.1 Brillouin-Rückstreuung

Die Brillouin-Streuung ist der dominierende nichtlineare Effekt in einer Monomodefaser, wenn schmalbandiges leistungsstarkes Laserlicht in die Faser eingestrahlt wird. Es handelt sich um eine induzierte Rückstreuung von Licht an Schallwellen im Fasermaterial. Die Frequenz der rückgestreuten Lichtwelle (Brillouin-Streuung) ist gegenüber der ursprünglichen Lichtwelle (Pumpwelle) zu niedrigeren Frequenzen hin verschoben. Diese Frequenzverschiebung wird Brillouin-Frequenzverschiebung (Brillouin-Frequenz f_B) genannt und hängt unter anderem von der Schallgeschwindigkeit ab. Physikalische Größen wie Temperatur und Dehnung verändern die Schallgeschwindigkeit und dadurch die Brillouin-Frequenz einer Faser. Durch Messung der Brillouin-Frequenz einer Faser kann eine Temperatur- und Dehnungssensorik realisiert werden. Eine Standardmonomodefaser besitzt bei Raumtemperatur eine Brillouin-Frequenz von ca. $f_B = 12,8$ GHz. Temperaturänderungen und Dehnungen verändern f_B mit ca. 1,2 MHz/°C bzw. 500 MHz/1% Dehnung [KREBBER, 2001]. Die Abhängigkeiten sind linear. Die Brillouin-Streuung kann in einer Monomodefaser von mehreren Kilometern Länge erzeugt und detektiert werden. Die Messung der Brillouin-Frequenzverschiebung

erfolgt ortsauflösend. Somit kann der Verlauf der Temperatur und der Dehnung auf der Faserstrecke ermittelt werden.

Zur Realisierung der Ortsauflösung werden reflektometrische Messverfahren, wie die Zeit- und Frequenzbereichsreflektometrie, eingesetzt. Z. B. werden bei der Zeitbereichsreflektometrie (Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA)) mittels eines Pulsgenerators sehr kurze Lichtpulse erzeugt und in die Faser geschickt. Aus dem zeitlichen Verlauf der Rückstreuung lassen sich Rückschlüsse auf die Brillouin-Frequenz und somit auf Temperatur und Dehnung in Abhängigkeit vom Faserort ziehen. Die Pulsdauer bestimmt dabei die Größe der Ortsauflösung (10-ns-Pulse entsprechen einer Ortsauflösung von 1 m). Im Jahr 1996 wurde ein alternatives Konzept namens Brillouin Optical Frequency Domain Analysis (BOFDA) eingeführt. Die BOFDA arbeitet mit sinusförmig amplitudenmoduliertem Licht und basiert auf der Messung der Übertragungsfunktion in der Frequenzdomäne durch einen Netzwerkanalysator (NWA). Ein Signalprozessor berechnet die inverse schnelle Fourier-Transformation (IFFT der Basisband-Übertragungsfunktion). Diese IFFT liefert eine gute Näherung der Impulsantwort des Sensors und entspricht der Dehnungs- und Temperaturverteilung entlang der Faser.

Brillouin basierte Sensorsysteme (BOFDA) zur Dehnungs- und Temperaturmessung arbeiten heute bei schnellen Messzeiten von ca. 20 Sekunden mit Auflösungen von etwa 2 $\mu\text{m}/\text{m}$ und 0,1 $^{\circ}\text{C}$ bei einer örtlichen Auflösung des Messsignals von 20 cm im kleinsten Messbereich von 2 km.

Für ein ortsverteiltes präzises Monitoring wie z. B. von Verformungen im Verpresskörper von Ankern inklusive der Rissbildung während der Eignungsprüfungen ist dieses Messverfahren auf Grund der zu geringen örtlichen Auflösung und der langen Messzeiten nicht geeignet.

3.3.2 Verteilte Temperaturmessung mit dem Raman-Effekt

Verteilte Temperaturmessungen können vorteilhaft mit Hilfe des Raman-Effekts realisiert werden [MOTIL et al, 2016]. Dieser entsteht durch Rückstreuung an thermischen Molekülschwingungen im Festkörper. Die Reflexionswellenlänge ist gegenüber der Anregungswellenlänge verschoben und in eine Stokes- und eine Anti-Stokes-Komponente aufgeteilt. Während die Stokes-Linie nur schwach temperaturabhängig ist, zeigt die Intensität der Anti-Stokes-Linie eine starke Temperaturabhängigkeit. Über die bekannte Ausbreitungsgeschwindigkeit des emittierten Lichtes in der Faser ist eine genaue Ortszuordnung möglich. Der Lichtwellenleiter wird dadurch selbst zum sensitiven Element. Das Messprinzip besteht darin, aus dem Spektrum des Rückstreulichtes die Stokes- und die Anti-Stokes-Linie herauszufiltern. Durch eine Verhältnisbildung der Intensitäten der beiden Linien werden mit Ausnahme der Temperatur alle anderen Einflüsse auf den Lichtwellenleiter eliminiert. Damit lässt sich die Temperatur für einen kleinen Lichtwellenleiterabschnitt bestimmen, während sich die zugehörige Ortskoordinate aus der entsprechenden Laufzeit des rückgestreuten Lichtimpulses ergibt. Mit der faseroptischen Temperaturmessung wird die mittlere (integrale) Temperatur für einen kleinen Abschnitt des Lichtwellenleiters bestimmt. Wesentliche Eigenschaften der faseroptischen Temperaturmesstechnik sind dabei die gleichzeitige Messung von Temperatur und Ort entlang der Messstrecke mit einer Ortsauflösung $\geq 0,5$ m. Es sind Messlängen bis zu 30 km, eine Temperaturauflösung bis zu 0,02 K bei einer Absolutgenauigkeit der Temperaturmessung bis zu $\pm 0,1$ K in einem

Messbereich -140 °C bis +460 °C zu erreichen. Es erfolgt keine Beeinflussung des Temperaturfeldes durch den Messvorgang. Das Verfahren eignet sich besonders für ein Langzeitmonitoring aber auch für diskontinuierliche Messungen zur Aufnahme von Temperaturprofilen. So wurde ein Messgerät auf Basis des Raman-Effekts (AP Sensing N4386) erfolgreich bei der Installation der Anker zur Messung der Temperaturentwicklung während des Aushärtens des Verpressmörtels eingesetzt.

Im Gegensatz zu anderen verteilt messenden Verfahren können hier ohne Nachteile herkömmliche Gradientenindexfasern zur Messung verwendet werden.

3.3.3 OFDR auf Basis der Rayleigh-Rückstreuung

Gegenüber den vorgestellten verteilten Messverfahren, die auf der Raman- bzw. Brillouin-Rückstreuung beruhen, bietet die optische Frequenzbereichsreflektometrie (Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR)) auf Basis der Rayleigh-Rückstreuung neben dem Vorteil der verteilten hochauflösenden Dehnungs- und Temperaturmessung eine sehr gute Ortsauflösung. Die Messzeit für eine Messung beträgt etwa drei Sekunden. Als Sensorfaser dienen Standardglasfasern. Damit ist es für die vorgesehene Aufgabe, den Dehnungsverlauf und die Rissbildung in den Verpressbereichen der Anker örtlich aufgelöst zu detektieren, prädestiniert [KINDLER et al, 2016].

Das optische Rückstreureflektometer OBR 4600 (Luna Innovations Inc.) stellt ein kommerzielles Messsystem dar, das nach diesem Verfahren arbeitet (Abbildung 7). Das OBR-System basiert auf der Messung der Rayleigh-Streuung, die als Folge zufälliger Schwankungen des lokalen Brechungsindex bei der Herstellung der optischen Fasern entsteht (Fingerabdruck der Faser). Eine Änderung des Spannungs- oder Temperaturprofils der Faser führt zu einer Änderung des Rayleigh-Rückstreusignals. Das Prinzip eines Swept-Wavelength Interferometer (SWI) wird verwendet, um ein hochauflöstes Rückstreusignal (Abtastauflösung ca. 10 µm) entlang des Messpfades zu erhalten. Dazu wird die komplexe Amplituden- und Phaseninformation im Frequenzbereich analysiert und in den Zeitbereich transformiert. Werden die Information mit einer Referenzmessung segmentweise korreliert, stellt das Ergebnis die verteilte Dehnungsänderung der Faser dar. Die verteilte Messung erreicht eine Dehnungsauflösung von $\pm 1,0 \mu\text{m}/\text{m}$.

Abhängig von der Systemkonfiguration kann mit einer räumlichen Auflösung von besser 10 µm bei 30 m Faserlänge, besser 20 µm bei 70 m Faserlänge und besser 1 mm bei einer Gesamtfaserlänge von 2 km gemessen werden. Die Dehnungsänderung kann mit einer Genauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}/\text{m}$ bestimmt werden. Dieses Messverfahren bietet vorteilhafte Möglichkeiten zur Diagnose großer Strukturen entlang des optischen Faserwegs und kann Dehnungsverteilungen von oberflächlich applizierten sowie strukturintegrierten optischen Fasern erfassen.

Auf Grund des sehr hochauflösenden Messprinzips ergeben sich beim Einsatz des Systems einige Aspekte, die zu beachten sind: In der kurzen Messzeit des Systems während des Wellenlängensweeps führen Vibrationen auf der Sensorfaser zu Messfehlern, die sich in Artefakten in der Dehnungs- bzw. Temperaturverteilung niederschlagen.

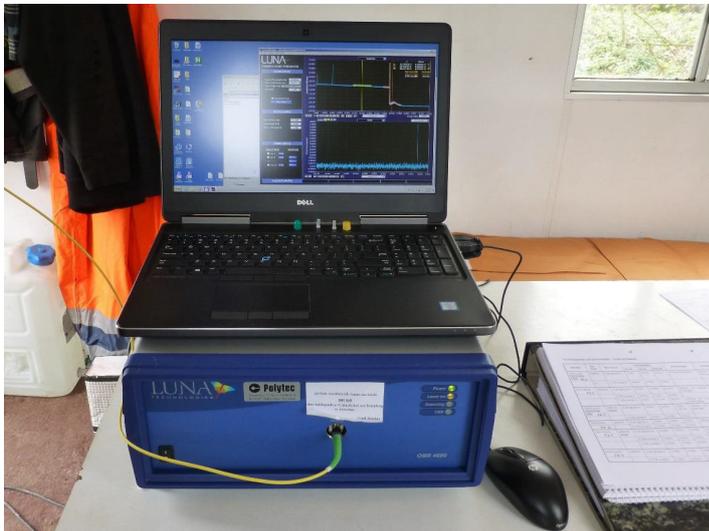


Abbildung 7: Optisches Rückstreureflektometer LUNA OBR 4600 im Einsatz bei einer Eignungsprüfung der Anker

Für die Messung von orts aufgelösten Dehnungsbeaufschlagungen und Temperaturprofilen ist es notwendig, dass sich das Messsystem auf eine sogenannte Referenzmessung beziehen kann, es führt also immer Relativmessungen durch.

Dieser Bezug auf eine anfängliche Referenzmessung kann bei diesem Gerät in der Praxis, insbesondere bei Feldeinsätzen, nur über einige Tage gewährleistet werden. Neben der beaufschlagten Dehnung werden die optischen Eigenschaften der Fasern durch geringfügige Spannungs-, Temperatur- oder Druckänderungen so verändert, dass auf die ursprüngliche Referenz nicht mehr Bezug genommen werden kann. Die Messergebnisse beinhalten immer mehr Artefakte, die eine Auswertung unmöglich machen. Somit sind jährliche Messungen der Faserdehnung (Rissdetektion) bei Bezug auf die ursprünglichen Referenzmessungen nicht sinnvoll zu realisieren.

Lediglich bei Dauermessungen lässt sich dies durch entsprechende Maßnahmen bei der Messdatenauswertung verhindern (neue Referenzmessung mit Umrechnung der Daten).

3.4 LWL-Messkabel und Sensordesign

Für den Praxiseinsatz an den Verpressankern wurden kommerziell verfügbare Sensorkabel für ortsverteilte Temperatur- und Dehnungsmessungen verwendet. Sie bestehen aus Standardglasfasern und sind in einem Kabelaufbau integriert, der sowohl den Schutz der Sensorfasern als auch bei den Sensorkabeln für die Dehnungsmessung eine gute Dehnungsübertragung vom Matrixmaterial auf die Sensorfaser sicherstellt.

Für die Dehnungsmessungen und Rissdetektion an allen sechs Versuchsankern kam ein spezielles Dehnungssensorkabel mit Volladern, Oberflächenstrukturierung und 3,2 mm Außendurchmesser zum Einsatz (Abbildung 8). Die strukturierte Manteloberfläche gewährleistet eine durchgehend kraftschlüssige Verbindung des Messkabels im Verpressbereich der Anker. Zusätzlich wurden die Anker mit flexiblen unstrukturierten 3 mm-Messkabeln mit Vollader ausgestattet.

Für die Aufnahme von Temperaturverläufen längs der Anker erhielt jeweils ein Anker pro Feld ein Multimodekabel mit Kompaktader.



Abbildung 8: Strukturiertes Dehnungsmesskabel

Sämtliche Messkabel wurden im Labor nach den Angaben der Auftraggeber vorkonfektioniert. Als Verbindungskabel dienten armierte optische Außenpatchkabel, die oberhalb des Verpressbereichs mittels Spleißverbindung mit den Sensorkabeln verbunden wurden. Der Schutz der Spleißstellen erfolgte mittels Metallummantelung.

4 Versuchsdurchführung

An den Verpressankern wurde eine Prüfung im Mai 2017, März 2018 sowie im November 2019 durchgeführt, bei denen jeweils die Verformungen der eingebauten Glasfaserkabel gemessen wurden. Zwischen den Prüfungen werden die Anker mit einer Kraft von rund 840 kN festgelegt. Zu Beginn der jeweiligen Eignungsprüfung werden zunächst Abhebeversuche zur Verifizierung der Ergebnisse der Kraftmessdosen und im Anschluss die Ankerprüfung nach Ablassen der Anker durchgeführt. Zum Schluss erfolgt die erneute Festlegung der Verpressanker.

Im Rahmen der ersten Untersuchung im Jahr 2017 wurde zunächst eine Prüflast von 1.670 kN festgelegt, die aber im Zuge der Belastung des ersten Ankers und der daraus resultierenden Setzungen des Widerlagers und möglichen Zerstörung des Glasfaserkabels abgemindert wurde. Somit wurde während der ersten Prüfung das Belastungsschema auf 480-660-840-1020-1200 kN mit jeweiliger Entlastung geändert. Eine exemplarische Darstellung des Belastungsschemas ist in Abbildung 9 wiedergegeben. Eine Auslesung des Glasfaserkabels des Ankers FA3 konnte aufgrund einer wahrscheinlichen Beschädigung bei der Herstellung nicht mehr durchgeführt werden. Infolge von relativen Verformungen zwischen Widerlager und Anker bei höheren Laststufen war eine Erfassung der Daten des Verpressankers FA1 nicht weiter möglich. Somit verbleiben zur Auswertung die Anker FA2 und

FA4-6. Aufgrund des zeitlichen Bauablaufes konnte während der ersten Festlegung keine Messung an den Glasfaserkabeln durchgeführt werden.

In den folgenden zwei Untersuchungen, 2018 und 2019, ist das Prüfschema zur Gewährleistung, dass keine weiteren Beschädigungen auftreten, auf 340-460-590-720-840-950 kN reduziert worden (Abbildung 9). Diese beiden Prüfungen konnten ohne Beeinträchtigungen erfolgen.

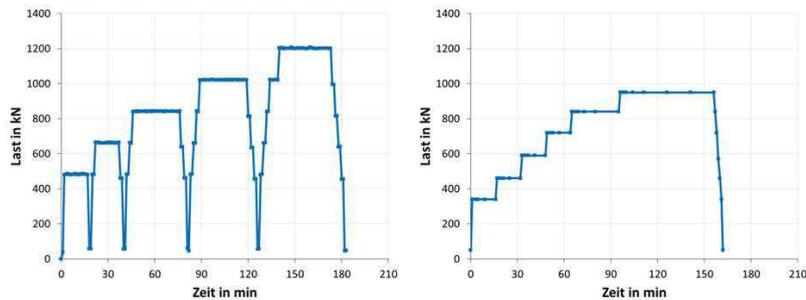


Abbildung 9: Prüfschema der Eignungsprüfungen an den Verpressankern in 2017 (links) bzw. 2018 und 2019 (rechts)

5 Versuchsergebnisse

5.1 Ankerprüfungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den relevanten Verpressankern FA2 und FA4-6 zeigen mit Ausnahme des Ankers FA2 übereinstimmende Ergebnisse. Eine Überschreitung des Kriechmaßes $k_s > 2$ mm führt lediglich bei Anker FA2 zu einem Versagen auf der höchsten Laststufe im Jahr 2017, obgleich ein erneutes Versagen mit den geringeren Spannungen in den Folgeprüfungen nicht mehr stattgefunden hat. Die Entwicklung der gemessenen Verformungen am Ankerkopf zeigt, dass die Hauptverformungen bei der ersten Prüfung eintreten und die weiteren Verschiebungen des Ankerkopfes in den beiden Folgeuntersuchungen nahezu identisch und sehr klein sind (Abbildung 10 und Abbildung 11). Die Werte der Kriechmaße über die steigenden Laststufen nehmen von der ersten Prüfung 2017 bis hin zur dritten Prüfung 2019 ab, wobei vor allem bei der zweiten und dritten Untersuchung ein identischer Verlauf zu erkennen ist.

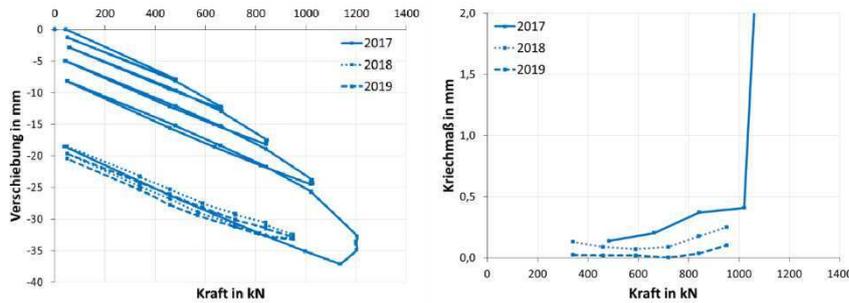


Abbildung 10: Kraft-Verschiebungs-Diagramm (links) und die Entwicklung des Kriechmaßes (rechts) des Ankers FA2

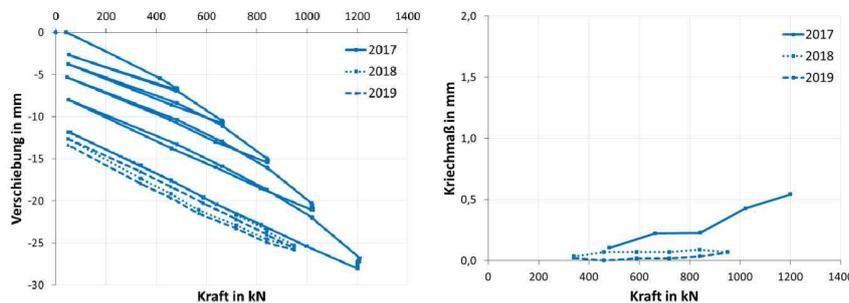


Abbildung 11: Kraft-Verschiebungs-Diagramm (links) und die Entwicklung des Kriechmaßes (rechts) des Ankers FA6

5.2 Dauermessung der Festlegekraft

Die Festlegekraft wird über die Kraftmessdosen und einen Datenlogger je Standort erfasst. Zwischen den Prüfungen ist ein Absinken der Kräfte zu beobachten. Eine Darstellung der Festlegelasten der Anker FA4-6 ist in Abbildung 12 gegeben. Die Datenlogger an den beiden Standorten wurden erst nach der ersten Festlegung gestartet, so dass der Ausgangswert in Anlehnung an die Vorgabe von 840 kN abgeschätzt wird. Der starke Abfall bis zum Beginn der Datenerfassung der Festlegekraft resultiert wahrscheinlich aus einer fehlerhaften Festlegung der Anker.

Bis zur zweiten Prüfung in 2018 sinken die Festlegekräfte der Anker FA1-3 auf rund 615 bis 645 kN und der Anker FA4-6 auf rund 490 bis 550 kN gemäß der erfassten Werte der Kraftmessdosen. Die überprüften Werte durch die Abhebeversuche ergeben rund 20 bis 60 kN mehr. In 2019 lagen die Kräfte zwischen ca. 640 und 710 kN bei den Ankern FA1-3 und 610 und 655 kN bei den Ankern FA4-6. Eine Abweichung nach oben um rund 50 bis 90 kN wurde durch die Abhebeversuche festgestellt. Ein Vergleich des Absinkens der Festlegelasten zwischen erster und zweiter bzw. zweiter und dritter Prüfung kann aufgrund der fehlenden Datenerfassung zu Beginn nicht vorgenommen werden. Ein identischer Verlauf der Entwicklung der Festlegekräfte ist vorstellbar, da in beiden Zeiträumen ein ähnlicher Kraftverlust festgestellt wurde.

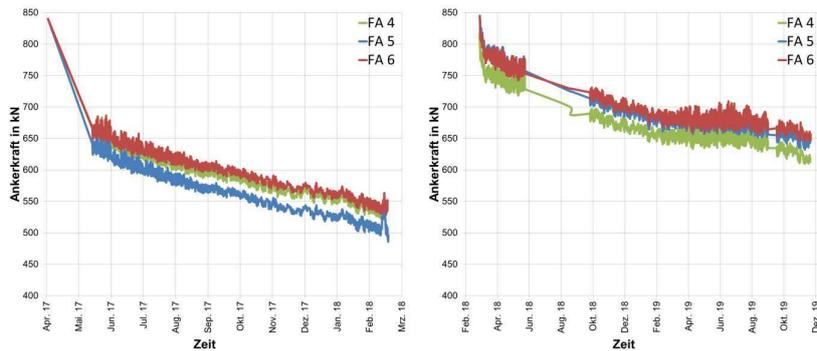


Abbildung 12: Festlegekräfte der Anker FA4-6 zwischen erster und zweiter (links) bzw. zweiter und dritter (rechts) Eignungsprüfung

5.3 Glasfasertechnische Messung

Infolge der verwendeten Glasfasermesstechnik auf Grundlage der Rayleigh-Rückstreuung haben die Messungen der einzelnen Jahre jeweils eine eigene neue Referenz, die bei völliger Entspannung des Ankers nach dem Abhebeversuch gemessen wurde. In Abbildung 13 bis Abbildung 15 sind die maximalen Dehnungen während der Laststufen der jeweiligen Prüfung für einen Anker entlang des Verpresskörpers dargestellt. Die maximalen Verformungen gegenüber der jeweilig neuen Referenz nehmen von Jahr zu Jahr ab. Ebenso verringert sich die Anzahl der Peaks, die für auftretende Risse stehen. Diese beiden Tatsachen lassen sich mit einer wahrscheinlich plastischen Verformung des Ankerkörpers anhand der aufgebrauchten Festlegekraft begründen, da diese bleibende Verformung mit den jeweiligen Referenzen nicht erfasst werden kann. Zudem ist ein Zusammenschluss mehrerer kleiner Risse zu einem größeren vorstellbar, wodurch sich die Anzahl und maximale Dehnung reduzieren. In allen drei Untersuchungen ist die Rissbildung im oberen Bereich des Ankers deutlich

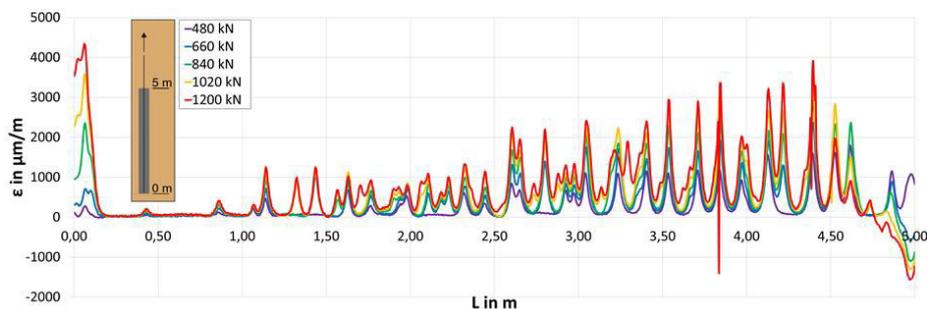


Abbildung 13: Darstellung der Dehnungen des Glasfaserkabels während der Laststufen der Ankerprüfung am Verpressanker FA4 in 2017

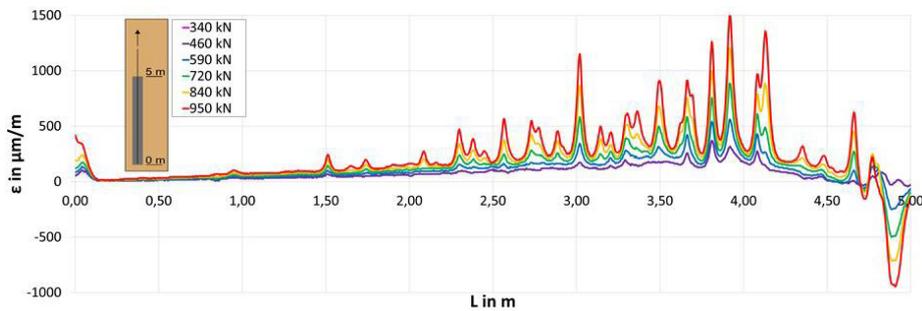


Abbildung 14: Darstellung der Dehnungen des Glasfaserkabels während der Laststufen der Ankerprüfung am Verpressanker FA4 bei der Prüfung 2018

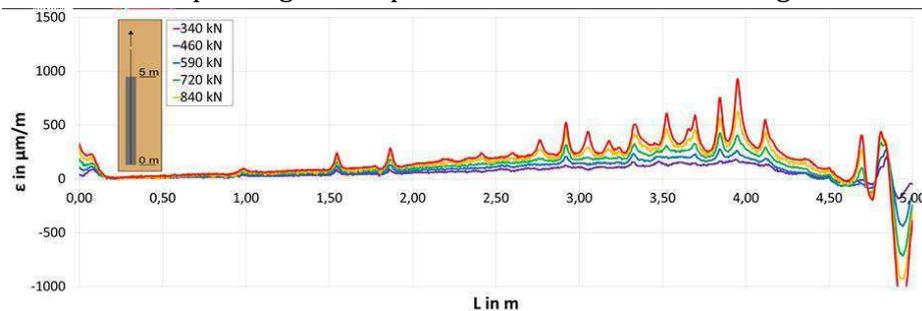


Abbildung 15: Darstellung der Dehnungen des Glasfaserkabels während der Laststufen der Ankerprüfung am Verpressanker FA4 bei der Prüfung 2019

ausgeprägter, was auf einen maßgeblichen Lastabtrag in diesem Bereich des Verpresskörpers zurückzuführen ist. Die Risse überprägen sich bei höheren Laststufen, d.h. es findet eine Aufweitung der Risse bei steigender Last statt. In der ersten Prüfung ist ersichtlich, dass sich mit zunehmender Laststufe neue Risse im Zementkörper bilden. Ein direkter Vergleich der Dehnungen der maximalen Laststufen zeigt, dass das Verformungsbild aus dem Jahr 2017 in den weiteren Prüfungen mit den jeweiligen neuen Referenzen nicht direkt wiederzuerkennen ist. Die Dehnungen in den Jahren 2018 und 2019 sind für den jeweiligen Anker prägnant. Beispielhaft ist dies in Abbildung 16 dargestellt.

Eine Integration der Dehnung über die Länge des Verpresskörpers ist in Abbildung 17 abgebildet. Im oberen Bereich der Verpressstrecke ist in allen drei Prüfungen zunächst eine negative Verformung, d.h. eine Stauchung, erkennbar. Dies lässt auf einen Druckbereich innerhalb des Zementkörpers schließen, welcher über die Jahre größer wird. Anschließend an diesen Druckbereich befindet sich eine Zone mit ansteigenden Dehnungen, die ein Indiz für Zugspannungen im Mörtel und somit stark wirkenden Zugkräften sind. Im unteren Abschnitt des Ankers verläuft die aufintegrierte Dehnung nahezu waagrecht, also ergeben sich kaum Verformungen im Verpresskörper und die aufgenommenen Zugkräfte sind sehr gering. Die maximal aufsummierte Dehnung liegt 2017 bei 1,5 bis 4,5 mm und nimmt über 2018 mit 1,2 bis 1,6 mm bis 2019 mit 0,8 bis 1,3 mm ab.

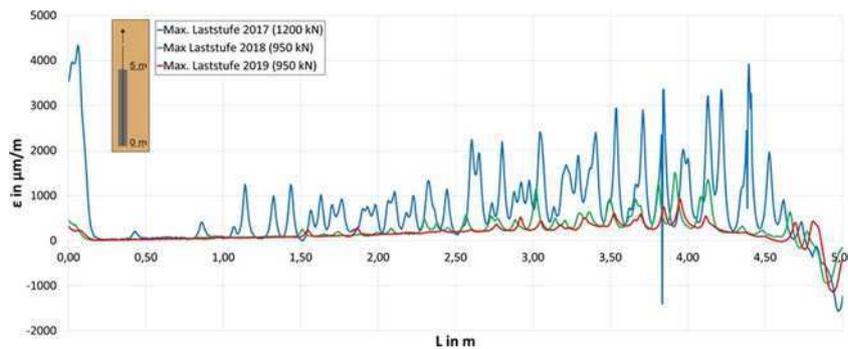


Abbildung 16: Dehnungen der maximalen Laststufen während der Eignungsprüfungen am Anker FA4

Eine Betrachtung der Einzelrisse im Zementkörper, also der Aufsummierung der Dehnungen eines einzelnen Peaks, ist exemplarisch in Abbildung 18 dargestellt. Die Verteilung der Risse über den Verpresskörper ist bereits aus den Dehnungen bekannt. Die Rissbreiten sind in der ersten Prüfung entsprechend der Dehnungen auch am höchsten. Der Vergleich der einzelnen Jahre ist aufgrund der jeweilig neuen Referenz nicht direkt durchführbar. Die Einzelrisse sind, wie in der Beispieldarstellung zu erkennen, nicht direkt korrelierbar zu den anderen Prüfungen. In 2017 ergeben sich maximale Rissbreiten zwischen 0,15 mm bei Anker FA1 und 0,50 mm bei Anker FA4. Die relativen Rissbreiten der Untersuchung in 2018 sinken auf 0,10 bis 0,20 mm und in 2019 auf 0,07 bis 0,15 mm. Eine Betrachtung der maximal zulässigen Rissbreiten bei Stahlbetonbauteilen nach DIN 1992-1-1:2011-01 zeigt, dass die Messwerte aus 2017 bis auf eine Messseite bei Anker FA4 innerhalb des Wertebereiches von 0,40 mm liegen.

Die Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen einen Vergleich der Dehnungen des Glasfaserkabels zwischen der Festlegelast vor und nach der Prüfung sowie der höchsten Belastungsstufen während der

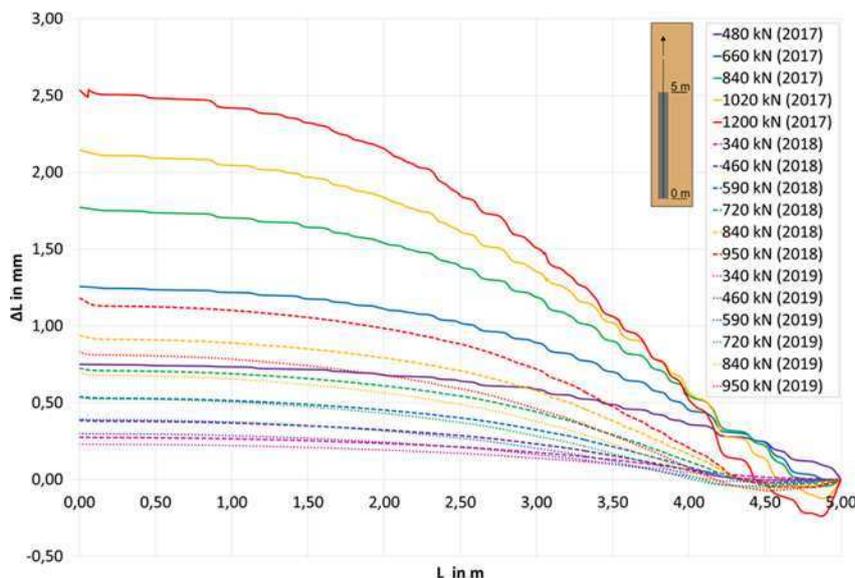


Abbildung 17: Darstellung der aufintegrierten Dehnung der Glasfasermessungen während der Eignungsprüfung des Ankers FA4 aus den Jahren 2017-2019

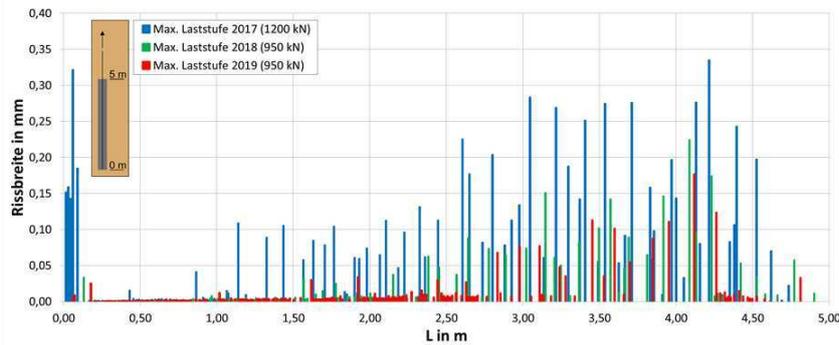


Abbildung 18: Rissbreiten während der maximalen Laststufen der Eignungsprüfungen des Ankers FA4

Eignungsprüfung. Die durch einen Abhebeversuch geprüften Festlegelasten lagen 2018 vor der Prüfung bei 540 bis 650 kN. Die Dehnungen der erneuten Festlegung mit 840 kN im Anschluss an die Prüfung entsprechen in etwa denen der höchsten Laststufe während der Eignungsprüfung (950 kN). In 2019 lagen die Festlegelasten bei 665 bis 685 kN (FA4-6) bzw. 795 kN bei Anker FA2. Wie bei dem Vergleich im Jahr 2018 zeigen sich in 2019 die Dehnungen der Festlegung nach Prüfung in etwa auf dem Niveau der höchsten Laststufe von 950 kN. Ausnahme bildet hierbei der Anker FA2, bei dem die Dehnungen bei Festlegelast zwischen denen der Laststufe 840 und 950 kN liegen. Die Festlegung nach erfolgter Eignungsprüfung zeigt in den beiden Untersuchungen 2018 und 2019 ein Überprägen der Dehnungen, ohne dass sich neue zusätzliche Risse bilden. Zudem zeigt sich, dass die Festlegung bei kleinerer Last identische Verformungen hervorruft wie die höchste Laststufe. Der dazwischenliegende Prozess des Ablassens und erneuter Kraftaufbringung bringt offensichtlich eine Änderung in der Verbundzone Zement-Boden.

An der Betrachtung bleibender Dehnungen im Zementkörper hervorgerufen durch die Untersuchungsprüfung, also vom kraftlosen Zustand vor und nach der Prüfung, lässt sich erkennen, dass die Prüfung in 2017 die größten Verformungen verursacht. Exemplarisch ist dies für den Anker FA4 in Abbildung 21 dargestellt. Die zunächst auftretenden bleibenden Risse in der ersten Prüfung verteilen sich gleichmäßig und gleichstark über fast den gesamten Verpresskörper im Gegensatz zu den Prüfungen in 2018 und 2019. Die bleibenden Dehnungen des Glasfaserkabels sind in der zweiten und

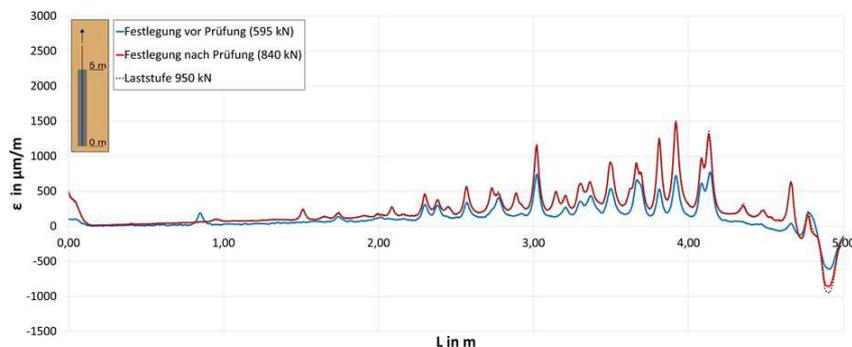


Abbildung 19: Dehnungen des Glasfaserkabels bei der Festlegelast 2018 vor und nach der Prüfung des Ankers FA4

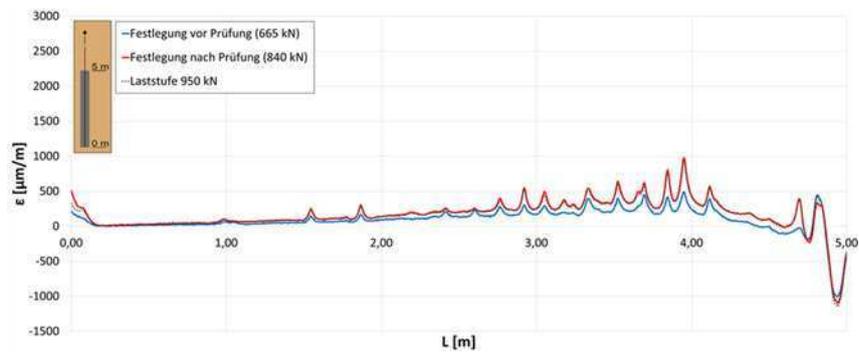


Abbildung 20: Dehnungen des Glasfaserkabels bei der Festlegelast 2019 vor und nach der Prüfung des Ankers FA4

dritten Prüfung verhältnismäßig klein, zeigen aber die Tendenz im Gegensatz zur ersten Untersuchung in der oberen Hälfte des Ankers ausgeprägter zu sein (Abbildung 22). Die Aufintegration der Dehnungen vom oberen Ende des Verpresskörpers bis zum Fuß zeigt eine bleibende Stauchung im oberen halben Meter bei der Untersuchung im Jahr 2017 (Abbildung 23). Die gesamte bleibende Verformung des Ankerkörpers liegt bei allen untersuchten Anker bei der ersten Untersuchung bei rund 0,9 mm und bei den weiteren Prüfungen bei unter 0,1 mm. Im Vergleich zu einer Gesamtlänge des Ankers von rund fünf Metern ist die Verformung der Verpresslänge von 0,2 Promille bzw.

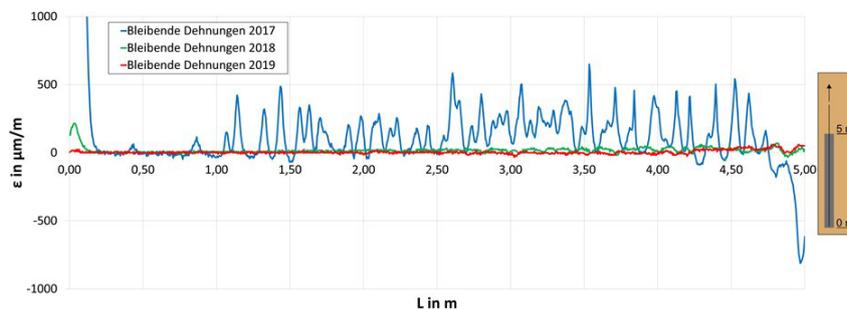


Abbildung 21: Bleibende Dehnung verursacht durch die Eignungsprüfung in den Jahren 2017 bis 2019 des Ankers FA4

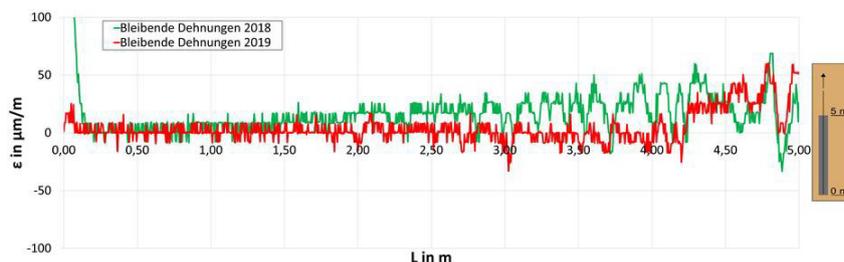


Abbildung 22: Bleibende Dehnung verursacht durch die Eignungsprüfung in den Jahren 2018 bis 2019 des Ankers FA4

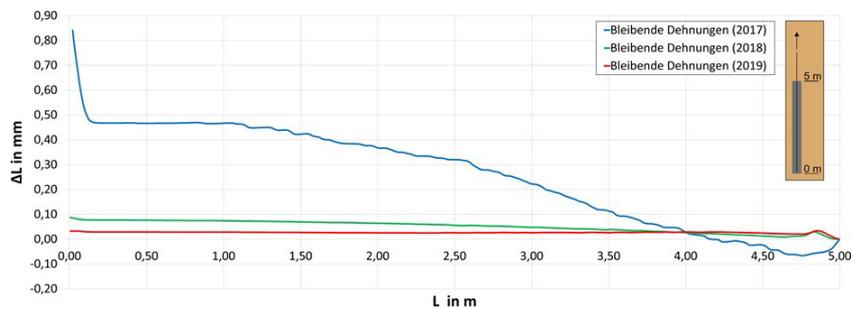


Abbildung 23: Aufintegrierte Dehnung des Ankers FA4 aus der bleibenden Dehnung verursacht durch die Ankerprüfung

0,02 Promille in der zweiten und dritten Prüfung gering. Bei der Erstprüfung treten erwartungsgemäß die größten bleibenden Verformungen auf, welche sich über fast den gesamten Verpresskörper homogen verteilen. Dies spricht zunächst für eine gleichmäßige Belastung über den Zementkörper. Im Zuge der zweiten und dritten Untersuchung treten bleibende Verformungen hauptsächlich im oberen Drittel auf. Daraus kann geschlossen werden, dass die zusätzlichen Lasten aus der Prüfung gegenüber der Festlegelast hauptsächlich im oberen Kräfteinleitungsbereich abgetragen werden.

Ein Vergleich der Dehnungen zwischen den Werten der Festlegung 2018 und der Festlegung 2019 jeweils bezogen auf die entsprechende Referenz zeigt, dass die erfassten Dehnungen eine Ähnlichkeit aufweisen. Die Festlegelasten sind in diesem Zeitraum, wie beschrieben, abgefallen, so dass kleinere Dehnungen aufgrund der geringeren Belastung zu erwarten sind. Ein Vergleich der Dehnungen der Prüfungen bei 590 bzw. 720 kN im Jahr 2018 zeigt ein identisches Verformungsbild wie das der Festlegung zur Referenz 2019 (Abbildung 24). Daraus folgernd ergibt sich keine größere bleibende Verformung in diesem Zeitabschnitt.

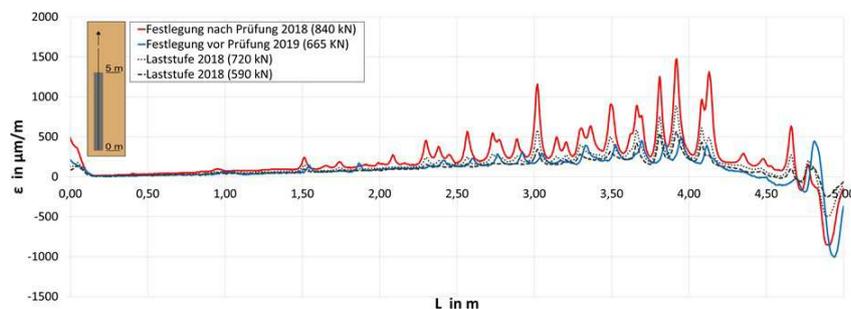


Abbildung 24: Dehnungen des Glasfaserkabels bei Festlegelast nach Prüfung 2018 und vor Prüfung 2019 des Ankers FA4 inklusive der Dehnungen aus der Eignungsprüfung 2018

6 Fazit und Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen der Auswirkungen von kalklösender Kohlensäure auf Verpressanker am DEK wurden Glasfasern in Kombination mit der Rayleigh-Rückstreuung verwendet. Das Lastabtragungsverhalten von Verpressankern lässt sich durch den Einsatz dieser Messtechnik expliziter untersuchen als mit den bisherigen Methoden über Dehnungsmessstreifen und Schwingsaitenaufnehmern. Eine Erfassung der Dehnung an jeder Stelle in sehr hoher Auflösung kann so gewährleistet werden. Die Anbringung im Zementkörper bei Verwendung von Einstabankern ist im

Baustellenbetrieb praktikabel und ohne größere Verzögerungen ausführbar. Die hier verwendete Rayleigh-Rückstreuung kann aufgrund der momentanen Auswertungsgeräte keine früheren Referenzen verwenden, da schon kleine Änderung in Spannung oder Temperatur zu Verschiebungen führen, die vom Auslesegerät nicht auf die Ursprungsreferenz bezogen werden können. Bleibende Verformungen zwischen den Untersuchungszeiträumen sind so nicht zu erfassen, wodurch ein periodisches Monitoring zur Überwachung nicht möglich ist. Zusammenhänge zwischen den einzelnen Prüfungen, vor allem der zweiten und dritten, sind erkennbar, aber schwer qualitativ auswertbar. Die ursprüngliche Fragestellung der abnehmenden Tragfähigkeit durch den chemischen Angriff ist aufgrund der jeweilig neuen Referenzen kaum zu beantworten ist. Insgesamt lassen sich aber mit diesem Verfahren sehr klein aufgelöste Dehnungen über die gesamte Länge erfassen, wodurch die Bildung von Rissen im Mörtel detektiert werden kann. Über dieses Rissbild lassen sich im Anschluss weitere Aussagen der Lastabtragung über den Verpresskörper in den Boden treffen.

In Zukunft wäre eine Kombination der Rayleigh-Rückstreuung mit anderen Verfahren zur punktuellen Auflösung vorstellbar, um einen Bezug der Referenzmessung sicherzustellen. Des Weiteren müssen die Rohdaten der Lichtwellenmessungen weitergehend betrachtet werden, um hier einen möglichen Zusammenhang zur ursprünglichen Referenz herzustellen.

Literatur

- Fabris, C.; Schweiger, H. F.; Woschitz, H.; Račanský; Pull-out behaviour of two post-grouted anchors: fibre-optic strain measurements and numerical simulations, Proceedings of the XVII ECSMGE-2019, Reykjavik, Iceland, 2019
- Kindler, A.; Schaller, M.-B.; Glözl, J.; Brentle, J.; Lich, A.; Nachweis der Ankertragfähigkeit am Beispiel eines innovativen Ankermonitorings, 12. Hans Lorenz Symposium, Grundbauinstitut, Technischen Universität Berlin, Heft Nr. 69, Berlin, S. 69-84, 2016
- Kindler, A.; Schaller, M.-B.; Glözl, J.; Nachweis der Ankertragfähigkeit auf Grundlage faseroptischer Messungen, Bautechnik (94), Heft 2, S. 144-151, 2017
- Krebber, K.; Ortsauflösende Lichtleitfaser-Sensorik für Temperatur und Dehnung unter Nutzung der stimulierten Brillouin-Streuung basierend auf der Frequenzbereichsanalyse, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2001
- Herten, M.; Schwab, R.; Numerische Auswertung von instrumentierten Zugversuchen an Auftriebspfählen, Pfahl-Symposium, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, H. 88, S. 493-512, 2009

Huybrechts, N.; De Vos, M.; Van Lysebetten, G.; Advances and innovations in measurement techniques an quality control tools, Proceedings ETC 3 Int. Symp. On Design of Piles in Europe, Leuven, Belgium, S. 209-233, 2016

Hof, C.; Über das Verpressankertragverhalten unter kalklösendem Kohlensäureangriff, Dissertation, Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum, Heft 35, 2004

Manns, W.; Lange, H.-D.; Einfluß aggressiver Wässer und Böden auf das Langzeitverhalten von Verpreßankern und Verpreßpfählen, Abschlussbericht, Bauforschung, Band T 2550, 1993

Motil, A.; Bergman, A.; Tur, M.; State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing, Bauforschung, Optics & Laser Technology 78, Part A (2016), S. 81-103, 2016

Schallert, M.; Krebber, K.; Hofmann, D.; Habel, W.; Stahlmann, J.; Auswahl geeigneter Fasersensorprinzipien für Anwendungen in der Geotechnik, Messen in der Geotechnik, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Nr. 77, S. 309-328, 2004

Schlüter, V.; Entwicklung eines experimentell gestützten Bewertungsverfahrens zur Optimierung und Charakterisierung der Dehnungsübertragung oberflächenapplizierter Faser-Bragg-Gitter-Sensoren, Dissertation, BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 2010

Triantafyllidis, T.; Schreiner, V.; Tragverhalten von Verpressankern unter kalklösender CO₂-Belastung, Abschlussbericht, Bauforschung, Band T 3167, 2007

Autoren

Fabian Heidenreich
Bundesanstalt für Wasserbau, Deutschland
Kussmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
E-Mail: fabian.heidenreich@baw.de

Markus Herten
Bundesanstalt für Wasserbau, Deutschland
Kussmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
E-Mail: markus.herten@baw.de

Detlef Hofmann
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Deutschland
Unter den Eichen 44-46, 12203 Berlin
E-Mail: detlef.hofmann@bam.de

Frank Basedau

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Deutschland

Unter den Eichen 44-46, 12203 Berlin

E-Mail: frank.basedau@bam.de