

Quasi-kontinuierliche Dehnungsmessungen an chemisch vorgespannten Balken

Katarzyna Zdanowicz¹, Steffen Marx¹

¹*Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland*

KURZFASSUNG:

Quasikontinuierliche faseroptische Sensoren und Messungen mit einem optischen Reflektometer auf Basis der Rayleigh-Rückstreuung ermöglichen die Untersuchung von Dehnungsänderungen im Beton und in der Bewehrung. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse einer solchen Messung von Längenänderungen bei der Aushärtung von Normal- und Quellbeton vorgestellt. Dieses Messverfahren eröffnet neue Perspektiven auch für chemisch vorgespannte Bauteile, da die Verformungen entlang der gesamten Elementlänge im Zeitverlauf untersucht werden können. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Chemische Vorspannung von textilbewehrten Sichtbetonbauteilen mit Quellbeton“ wurden das Schwinden und das Quellen von neun axial bewehrten Betonbalken untersucht. Darüber hinaus konnte die Übertragungslänge bestimmt werden, nach der die Betondehnungen auf die Bewehrung übertragen werden.

Keywords: chemische Vorspannung, Quellbeton, quasikontinuierliche Dehnungsmessung, faseroptische Sensoren

ABSTRACT:

Distributed fibre optic sensors and measurements conducted with an optical reflectometer based on Rayleigh scattering phenomenon allow to investigate strain changes in concrete and its reinforcement. Here results of measuring length changes during hardening of normal and expansive concrete are presented. This novel measurement method opens new possibilities for chemically prestressed elements, as the deformations along the total element length can be investigated in time. As a part of a research project “Chemical prestressing of thin textile reinforced concrete elements”, shrinkage and expansion of nine axially reinforced concrete beams were investigated. Furthermore, it was possible to determine the transfer length after which the concrete strains are transferred to the reinforcement.

Keywords: chemical prestressing, expansive concrete, strain measurement, distributed fibre optic sensor

1 EINLEITUNG

Die chemische Vorspannung ist eine Technologie, die es ermöglicht, Druckkräfte im Beton durch ein kontrolliertes Quellen des Betons und durch gleichzeitige Verformungsbehinderung infolge innerer Bewehrung einzuleiten. Diese Methode wurde in den 1930er Jahren in Frankreich erstmals beschrieben und nach dem Zweiten Weltkrieg vor allem in Japan und den USA weiterentwickelt (Möll 1954, Aroni et al. 1968, Okamura et al. 1977). Das Anwendungsfeld war zu diesem Zeitpunkt noch nicht sehr breit, so dass die Entwicklungsarbeiten unterbrochen wurden. Derzeit erscheint es als vielversprechende Alternative für z. B. dünne, mit textilen Gittern bewehrte Bauteile, bei denen herkömmliche Vorspannverfahren häufig fehlschlagen.

Um eine ausreichende Vorspannung zu gewährleisten, sollte die Dehnung während und unmittelbar nach dem Erstarrungs- und Aushärtungsprozess des Betons erfolgen. So ist eine ausreichende Verbundfestigkeit zwischen Beton und Bewehrung gewährleistet, aber gleichzeitig lässt die geringe Steifigkeit noch eine Verformung zu, ohne die innere Struktur des Betonprobekörpers zu beschädigen. Ein nach der ersten Quellenphase auftretendes Schwinden trägt zu Spannkraftverlusten bei.

Die Beton- und Bewehrungsverformungen während des Erhärtungsprozesses und darüber hinaus zu erfassen ist daher von großer Bedeutung. Dieser Beitrag gibt einen Einblick, wie die behinderten Verformungen von expansiven Betonprobekörper bisher gemessen wurden und welche Möglichkeiten heutzutage durch quasikontinuierliche faseroptische Sensoren entstehen.

2 DEHNUNGSMESSUNGEN AN QUELLBETON

2.1 *Restrained Expansion Tests*

Für die Untersuchung des Quellens von Betonprobekörpern existieren bisher keine nationalen Richtlinien. Am häufigsten wird für die Messung des behinderten Quellens (zur Untersuchung der in die Bewehrung eingebrachten Dehnungen) der sogenannte *Restrained Expansion Test* (RET) aus dem ASTM C878 Standard (ASTM 2015) verwendet. Bei dieser Methode wird die Länge einer Gewindestange gemessen, die in einem prismatischen Betonprobekörper mittig eingebaut ist. Der Probekörper hat die Abmessungen von 80 x 80 x 240 mm³ und an beiden Enden werden Stahlankerplatten mit Schrauben befestigt, um ideale Verbundbedingungen zu simulieren (Bild 1).

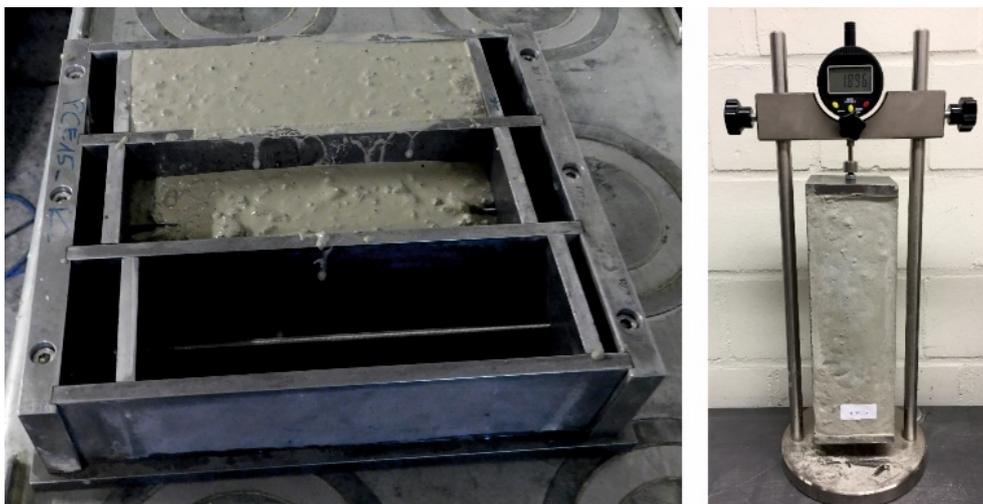


Bild 1: Probekörper für das RET-Messverfahren nach ASTM C878 während des Betonierens (links) und die Messung der Stahlstabverformung infolge Quellen (rechts)

2.2 Quasikontinuierliche Dehnungsmessungen

2.2.1 Prinzip

Eine alternative und neuartige Methode zur Messung von Dehnungen in Beton und Bewehrung sind quasikontinuierliche faseroptische Sensoren (Fischer et al. 2019, Sienko et al. 2018). Die Sensoren bestehen aus Glasfasern mit dem Kerndurchmesser von 9 μm , welche dann mit weiteren Schichten ummantelt sind. Insgesamt ist der Durchmesser der Fasern kleiner als 0,2 mm und beeinflusst damit das Verhalten des Bauteils marginal. Das Messprinzip basiert auf der Rayleigh-Rückstreuung des Frequenzspektrums des Lichtsignals und ermöglicht eine quasikontinuierliche Erfassung der Dehnungsverteilung entlang der Fasern mit kleinem Messpunktabstand (ab 5 mm). Für die Untersuchungen wurde der optische Reflektometer OBR 4600 der Fa. Luna verwendet. Zur Messung der Dehnungen wurde an dem Stahlbewehrungsstab eine Glasfaser geklebt. Die Verformungen vom Beton wurden mit sog. EpsilonRebar der Firma SHM Company ermittelt. Das EpsilonRebar besitzt einen Durchmesser von 2 mm und einen Elastizitätsmodul von 3 GPa und soll in dem Beton nicht als zusätzliche Bewehrung wirken.

2.2.2 Applikationsbeispiel: Stahlbetonbalken

Im Versuchsprogramm wurden drei Betonmischungen verwendet – Normalbeton (C00-Mischung) und zwei Betone mit Quellzusatzmittel (C15 und C20, mit einer Dosierung des Zusatzmittels von 15% und 20% des Zementgewichts), die eine chemische Vorspannung einleiten sollten. Das Prinzip der chemischen Vorspannung sowie die Details von Betonmischungen sind in (Zdanowicz, Marx 2018) zu finden. Aus jeder Mischung wurden drei Balken mit einer Länge von 2 m und einem Querschnitt von 16 x 16 cm hergestellt. Die Balken wurden in Querschnittsmitte mit einem Bewehrungsstab von 12 mm Durchmesser bewehrt.

Die glasfaseroptischen Sensoren wurden in allen neun Betonbalken installiert. Eine Sensorfaser wurde auf den Bewehrungsstab geklebt und ein EpsilonRebar-Sensor wurde so in der Schalung befestigt, dass fünf weiteren Messstrecken im Balkenlängsrichtung bereitgestellt werden: zwei an der Unterseite des Trägers, zwei an der Oberseite und eine 2 cm über dem Bewehrungsstab (Skizze ist in Abb. 2 und die Sensoren beim Betonage in Abb. 3 dargestellt). Zusätzlich wurden jeweils drei herkömmliche Dehnungsmessstreifen auf den Bewehrungsstäben installiert. Sie befinden sich in der Mitte und in 30 cm Abstand zur Mitte.

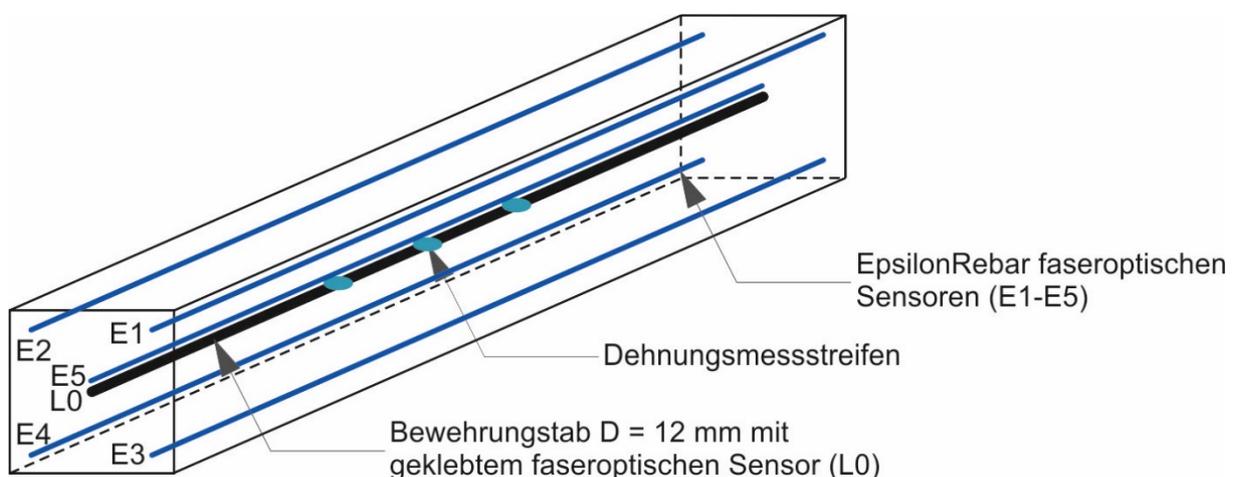


Bild 2: Balkenskizze mit eingebauter Bewehrung und Sensoren

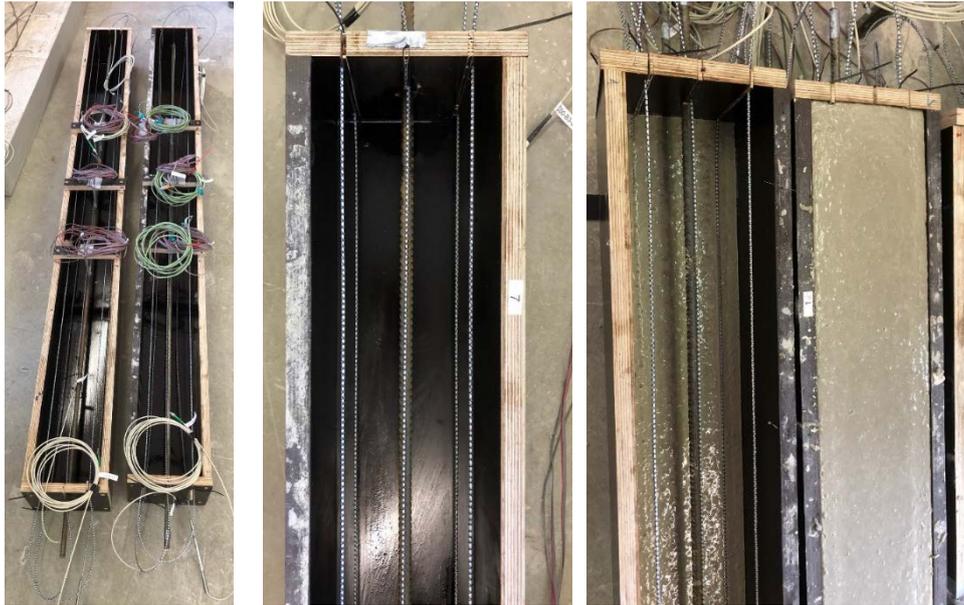


Bild 3: Balken mit eingebauter Bewehrung und Sensoren: Schalung, Sensoren und Betonage

Die Dehnungen wurden ab drei Stunden nach dem Betonieren erfasst. Das quasikontinuierliche Messprinzip bedeutet, dass während des Postprocessings die Länge des Messbereiches festgelegt sein kann. Bei dieser Auswertung der Messergebnisse wurden Dehnungsmesslängen von 1 cm in einem Raster jeweils von 1 cm angenommen, somit wurde die Gesamtlänge des Bauteils mit Messpunkte abgedeckt. Da der maximale Durchmesser der Gesteinskörnung 8 mm beträgt, gibt es einige Stellen, wo lokale Dehnungsänderungen beobachtet sein können (im Beton an Sensoren E1-E5, Abb. 4 – 6). Ebenso werden bei den Sensoren, die auf den Bewehrungsstäben appliziert wurden, auch unregelmäßige Dehnungsspitzen angezeigt. Diese Störungen und Spitzen können durch die Annahme eines längeren Messbereiches während des Postprocessings reduziert werden.

3 ERGEBNISSE DER DEHNUNGSMESSUNGEN

3.1 *Dehnungsentwicklung in Zeit entlang der Probekörper: faseroptischen Sensoren*

Für die oben beschriebenen Balken wurden die Dehnungen während des Aushärtens 24 Tage lang gemessen. In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse aus den ersten 10 Tagen dargestellt, da die Veränderungen nach dieser Zeit nur geringfügig waren. Durch die faseroptischen Sensoren konnte ein tiefer Einblick in das Verhalten von Beton und Bewehrung über die gesamte Länge realisiert werden.

In Abb. 4 ist das Schwinden von Normalbeton dargestellt, welches im mittleren Teil des Balkens konstant und an den beiden freien Enden etwas größer ist. Etwas höhere Schwindmaße werden auch in der Nähe der Oberseite des Balkens (Sensoren E1, E2) im Vergleich zur Unterseite (Sensoren E4, E5) beobachtet. Die Unterseite lag auf dem Boden und war somit besser vor dem Austrocknen geschützt. Nicht zuletzt kann die Übertragung der Schwinddehnungen vom Beton auf die Bewehrung festgestellt werden, wenn die Sensoren E5 und L0 verglichen werden. Die mit einem faseroptischen Sensor gemessenen Schwindverformungen in der Mitte des Balkens sind entlang der Balkenlänge konstant, während die Verformungen der Bewehrung unregelmäßiger und niedriger sind und eine definierte Übertragungslänge benötigen – es ist zu beobachten, dass die Verformungen in der Bewehrung erst nach ca. 20 cm von beiden Enden konstant sind.

Noch deutlicher werden diese Übertragungslängen bei Probekörpern, die aus Quellbetonen hergestellt wurden (Abb. 5 und 6). Hier kann beim Vergleich der Ergebnisse der Sensoren E5 und L0 für jeden Balken die Übertragungslänge relativ genau beschrieben werden (siehe rote gestrichelte Linien in Abb. 7). Zwischen den Betonmischungen C15 und C20 kann noch ein weiterer Unterschied festgestellt werden (Abb. 8) – nach einiger Zeit des Quellens nehmen die Dehnungen der C15 Beton ab, während bei den C20 Probekörpern bis zu 10 Tage keinerlei Dehnungsabnahme beobachtet wird, obwohl das Quellen ebenfalls nachlässt oder stoppt.

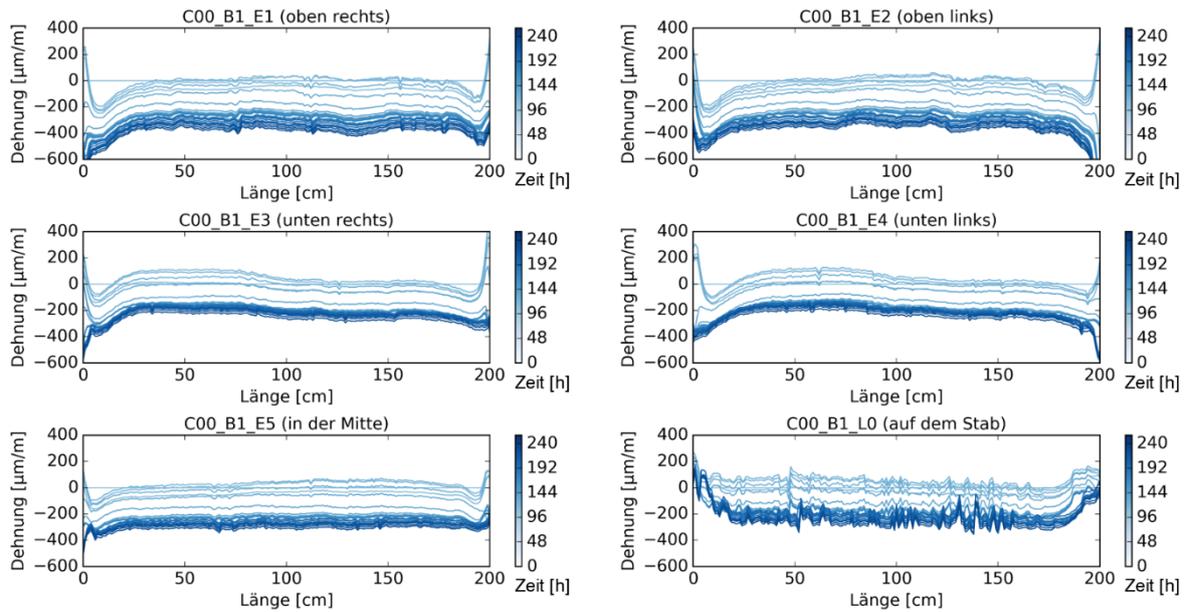


Bild 4: Dehnungsentwicklung über die Zeit bei einem Probekörper der Serie C20

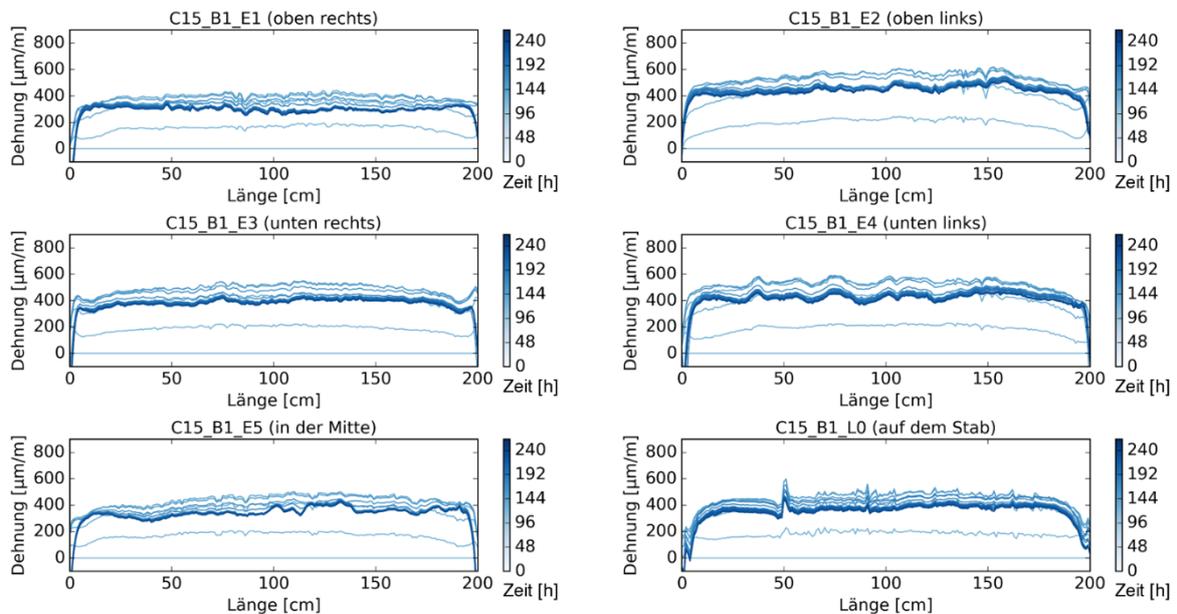


Bild 5: Dehnungsentwicklung über die Zeit bei einem Probekörper der Serie C15

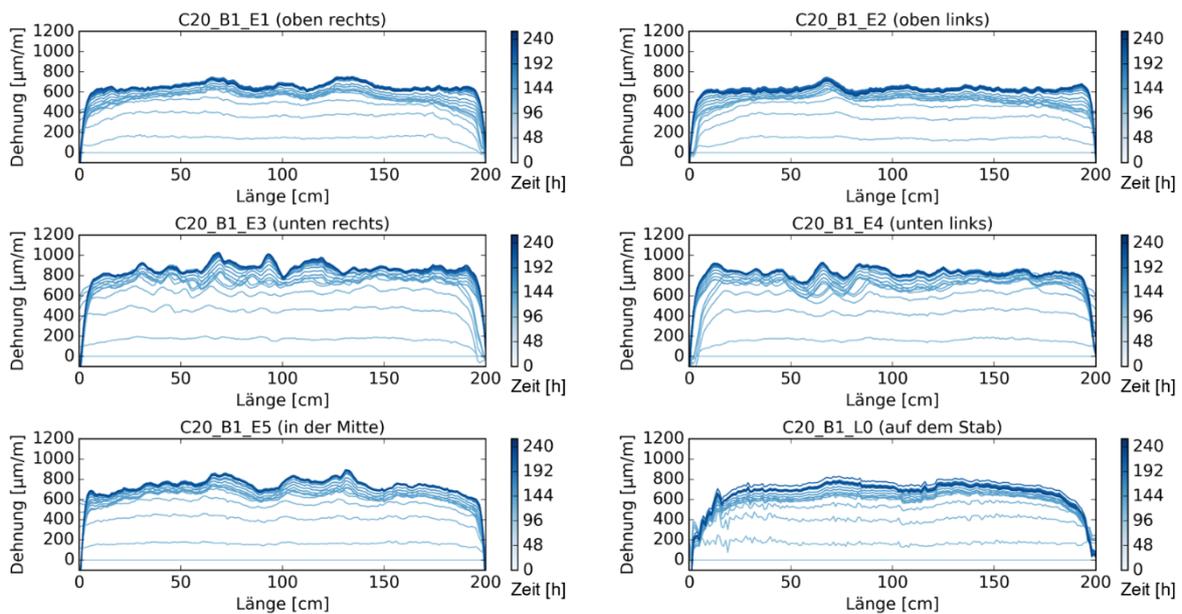


Bild 6: Dehnungsentwicklung über die Zeit bei einem Probekörper der Serie C20

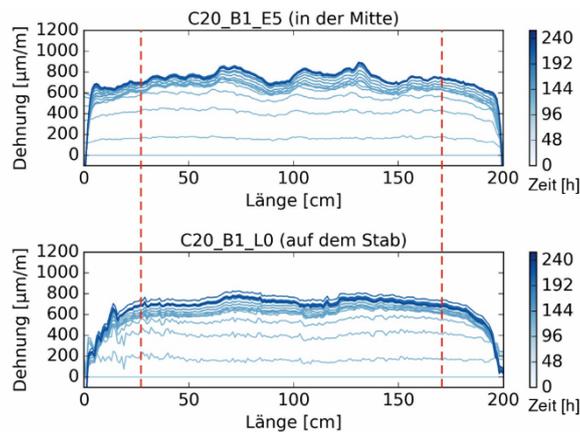


Bild 7: Übertragungslänge bei einem Probekörper der Serie C20

3.2 Dehnungsentwicklung über die Zeit in ausgewählten Messpunkten: faseroptischen Sensoren

Um die zeitliche Entwicklung der Dehnungen in den verschiedenen Betonmischungen besser vergleichen zu können, sind in Abb. 8 Dehnungen in den Mittelpunkt jedes E5-Sensors (in der Mitte des Betonprobekörpers) und L0-Sensors (auf dem Bewehrungsstab) dargestellt. Das Schwinden der Mischung C00 setzt sich nach dem 24. Tag fort, während die Mischung C15 nach dem ersten Quellen ebenfalls langsam zu schwinden beginnt. Die in die Mischung C20 eingebrachten Quelldehnungen bleiben nach 24 Tagen relativ konstant. Es ist auch zu beachten, dass für jede Mischung die Betondehnungen im Mittelabschnitt auf den Betonstahl übertragen werden, da die beiden Kurven (E5 und L0) einen ähnlichen Verlauf aufweisen. In einem Abstand von 10 cm von den Balkenenden ist dies bei allen Probekörper nicht vollständig der Fall (Abb. 9), dann liegen die Unterschiede zwischen Beton- und Bewehrungsdehnungen zwischen 50 und 200 $\mu\text{m/m}$.

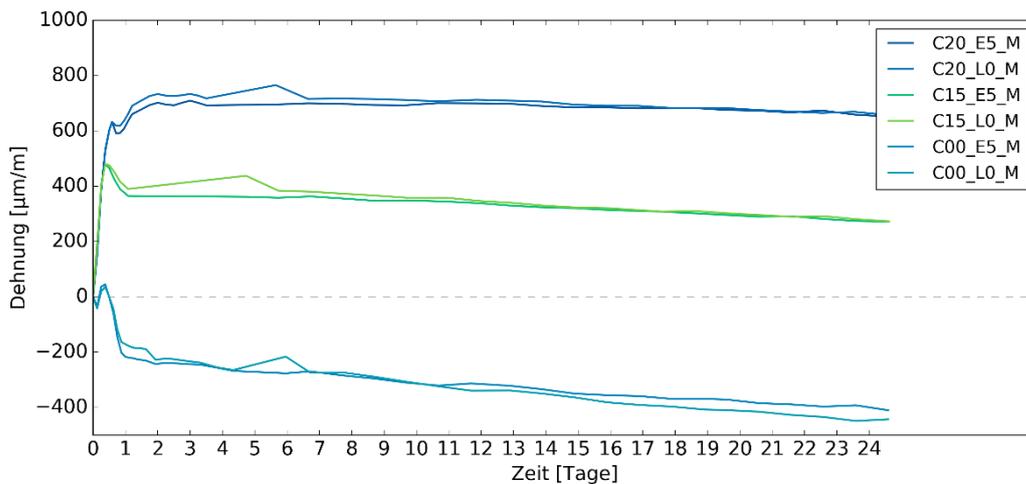


Bild 8: Dehnungen in den Mittelpunkten der E5-Sensoren (in der Mitte des Betons) und L0-Sensoren (auf dem Bewehrungsstab) in Probekörper C00, C15 und C201

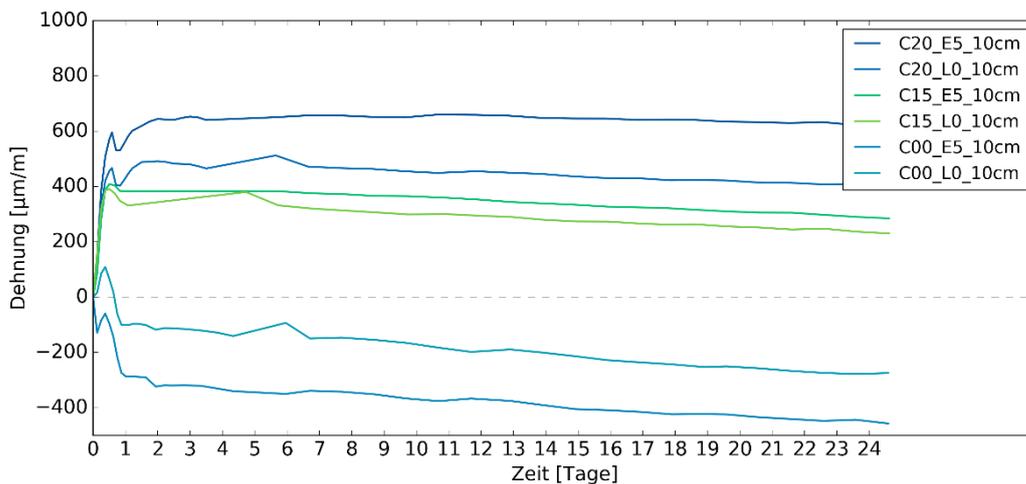


Bild 9: Dehnungen in Abstand 10 cm von Balkenende gemessen an der E5-Sensoren (in der Mitte des Betons) und L0-Sensoren (auf dem Bewehrungsstab) in Probekörper C00, C15 und C20

3.3 Ergebnisse der RET

Die Messungen mit RET-Tests wurden parallel zu den Messungen mit faseroptischen Sensoren durchgeführt (Bild 10). Bemerkenswert ist jedoch, dass nicht nur die Geometrie der Proben (Querschnitte und Länge) unterschiedlich war, sondern auch die Bewehrungsgrade: 0,3% für RET-Proben und 0,4% für Balken. Somit sind die mittels RET an C15- und C20-Probekörpern gemessenen Dehnungen geringer als bei den faseroptischen Messungen an den Balken. Die Schwinddehnungen der C00-Mischung wurden jedoch weitgehend übereinstimmend gemessen, sie sind bei RET-Proben nur geringfügig geringer. Darüber hinaus erfassen die Messungen mit RET die Mittelwerte der Gesamtverformungen der Stäbe, wobei faseroptische Sensoren eine Messung in einem nachträglich ausgewählten Punkt ermöglichen.

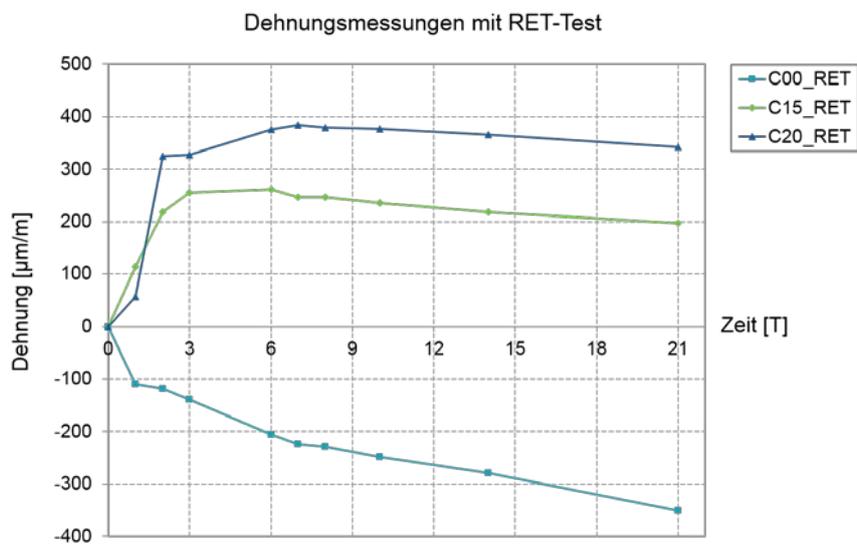


Bild 10: Ergebnisse der behinderten Quellen Messungen mit RET-Test

4 ZUSAMMENFASSUNG

Verteilte faseroptische Sensoren bieten weitaus mehr Möglichkeiten für eine tiefgehende Analyse der Dehnungszustände im Vergleich zu herkömmlichen Messtechniken für Dehnungsmessungen. Für chemisch vorgespannte Bauteile sind solche Untersuchungen von besonderer Bedeutung, da die gesamte Länge (oder auch die Oberfläche) eines Bauteils kontinuierlich überwacht werden kann. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Übertragungslängen, nach der die Gesamtkraft aus Beton auf die Bewehrung übertragen wird, direkt erfasst und bestimmt werden können. Solche Messungen sind mit herkömmlichen Messtechniken nicht möglich oder würden mit einer erheblichen Beeinträchtigung des Verbundes durch Sensorschutzsysteme und Verkabelung einhergehen.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen an den Balken waren Teil eines größeren Forschungsprogramms, das auch dünne Platten mit Textilbewehrung umfasste (Abb. 11), bei denen die Dehnungen in beide Richtungen der Plattenebene gemessen wurden. Hierbei wurden die Dehnungen an Carbondtextilgittern gemessen, was mit konventionellen Dehnungsmessstreifen aufgrund der Geometrie der Textilgelege bisher nicht einfach oder gar nicht möglich war.



Bild 11: Textilhewehrung mit faseroptischen Sensoren (links) und Platte nach dem Ausschalen (rechts)

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich für die Förderung durch die Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.37) sowie bei der Firma Max Bögl Bauservice GmbH & Co. KG für die Beteiligung an dem Projekt.

LITERATUR

- Aroni, S., Bertero, V., & Polivka, M. (1968): Chemically Prestressed Concrete, *PCI Journal*, 13(5), S. 22–35.
- ASTM C878 (2015): Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete. ASTM International
- Fischer, O., Thoma, S. & Crepaz, S. (2019): Quasikontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung zur Rissdetektion in Betonkonstruktionen, *Beton- und Stahlbetonbau*, 114, S. 1–10.
- Möll, H. (1954): *Spannbeton*, Berliner Union.
- Okamura, H., Tsuji, Y. & Maruyama, K. (1977): Application of Expansive Concrete in Structural Elements, *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo*, B 34(3), S. 481–507.
- Sieńko, R., Zych, M., Bednarski, Ł. & Howiacki, T. (2018): Strain and crack analysis within concrete members using distributed fibre optic sensors, *Structural Health Monitoring*, S. 1-17.
- Zdanowicz, K. & Marx, S. (2018): Thin concrete panels prestressed with carbon textile reinforcement: flexural testing. In: *Proceedings of 5th International fib Congress „Smarter - Better - Stronger“*, Melbourne, Australien.