
UNTERSUCHUNGEN ZUM BIEGE-KRIECHVERHALTEN VON FASERBETON MIT MAKRO-SYNTHETISCHEN BIKOMPONENTENFASERN

TESTS OF BENDING – CREEP BEHAVIOR OF FIBER REINFORCED CONCRETE WITH MACRO SYNTHETIC BI-COMPONENT FIBERS

Dr. Josef **Kaufmann**, EMPA, Dübendorf/CH
Dipl. Ing. (FH) Robert **Bader**, Brugg Contec AG, Romanshorn/CH
Dipl. Ing. (FH) Mario **Manser**, Brugg Contec AG, Romanshorn/CH

Faserspritzbeton hat sich im Untertagebau als kostengünstige Alternative zu konventionellem Stahlbeton erwiesen. Meist werden dabei Stahlfasern verwendet. In letzter Zeit wurden auch makrosynthetische Kunststofffasern eingesetzt. Kunststofffasern können (Biege-) Zugkräfte in ähnlicher Größenordnung wie Stahlfasern aufnehmen, haben zudem noch den Vorteil der Biegsamkeit und somit besserer Verarbeitbarkeit und nur geringer Schädigung von Dichtungsbahnen und geringer Verletzungsgefahr. Ausserdem korrodieren Kunststofffasern nicht und sind säureresistent, haben aber oft Nachteile hinsichtlich des Dauerlastverhaltens. Im Gegensatz zu Stahl kann eine dauernd wirkende Spannung bei Kunststoff (polyolefin) basierten Fasern zu einer zeitabhängigen Verformung („Kriechen“) führen. Das Kriechverhalten von faserbewehrten Betonen unter Druckbeanspruchung unterscheidet sich nicht von dem fasernfreier Betone. Dasselbe gilt für Zugbeanspruchung im ungerissenen Zustand. Im gerissenen Zustand sind für die Erfassung der zeitabhängigen Vorgänge unter Zugbeanspruchung die Effekte des Kriechens, des Verbunds zwischen Faser und Matrix sowie Fasermaterialkriechen zu berücksichtigen.

Das Kriechverhalten von Faserbeton wurde anhand von definiert vorgerissenen Betonprismen (analog EN 14488-3) und Quadratplatten (analog EN14488-5) im Dauerbiege-lastversuch untersucht. Damit sollen die Grundlagen für Empfehlungen für ein maximal zulässiges Lastniveau für Dauerbeanspruchung von Querschnitten unter Biegebeanspruchung geschaffen werden. Durch entsprechende Additive, Erhöhung des Kristallinitätsgrades bzw. des E-Moduls kann das Kriechen von polyolefin basierten Fasern stark vermindert werden.

Am Beispiel einer strukturierten Bikomponentenfaser wird aufgezeigt, dass in Dauerlastversuchen, selbst nach einem Jahr und bei hohen Lastniveaus, nur unkritische Längenverformungen auftreten.

In tunnel and mining applications, spraying of fiber reinforced concrete is a well-established and economical alternative to conventional casting techniques. Recently, macro-synthetic fibers have been applied. Such macro-synthetic fibers can bear bending forces in the similar range like steel fibers and have further advantages regarding their high flexibility with less damage of sealing membranes and reduced injury risks. Furthermore they do not corrode and are acid-resistant, but may have some drawbacks regarding permanent loading. Contrary to steel, polymer (polyolefin) based fibers may creep. The creep behaviour of bi-component plastic fiber reinforced pre-cracked concrete prisms and panels was studied. No critical deformations were found under application-oriented permanent loads.

1. Einleitung

Im Gegensatz zu Stahl kann eine dauernd wirkende Spannung bei polyolefin basierten Fasern zu einer zeitabhängigen Verformung („Kriechen“) führen. Das Kriechverhalten von faserbewehrten Betonen unter Druckbeanspruchung unterscheidet sich jedoch nicht von dem faserfreier Betone. Dasselbe gilt für Zugbeanspruchung im ungerissenen Zustand: Rissfreie Faserbetone kriechen unter Zugbeanspruchung gleich stark wie faserfreie Betone.

Im gerissenen Zustand sind für die Erfassung der zeitabhängigen Vorgänge unter Zugbeanspruchung, die Effekte des Kriechens, des Verbunds zwischen Faser und Matrix sowie Fasermaterialkriechen zu berücksichtigen [1,2].

Durch entsprechende Additive, Erhöhung des Kristallinitätsgrades bzw. des E-Moduls kann das Kriechen von polyolefin basierten Fasern stark vermindert werden.

Bei den hier verwendeten Bikomponentenfasern sind diese Additive eingebaut und der Reckgrad der Fasern ist relativ hoch, so dass daraus auch ein entsprechend hoher E-Modul resultiert. Die verwendeten Bikomponentenfasern weisen zudem eine Strukturierung der Oberfläche in Form von sich verengenden Stellen auf. Dadurch ist ein positiver Einfluss auf das Kriechverhalten, insbesondere hinsichtlich des Einflusses des Fasermaterialkriechens auf den Verbund zu erwarten.

Ziel der durchgeführten experimentellen Untersuchungen war es, das zeitabhängige Verformungsverhalten auf Material- und Bauteilebene quantitativ zu erfassen. Damit sollen die Grundlagen für ein zulässiges Lastniveau bei Dauerbeanspruchung dieser Fasern unter Biegebeanspruchung geschaffen werden.

2. Materialien und Methoden

Der Einfluss verschiedener Faserparameter auf das Kriechverhalten von Faserbeton im gerissenen Zustand wird an Bikomponentenfasern [3] untersucht. Diese Fasern zeichnen sich dadurch aus, dass sie einen Kern aufweisen, welcher von einem Mantel unterschiedlicher Polymerzusammensetzung umschlossen wird. Der Faserkern ist dabei auf hohe Festigkeit und Elastizitätsmodul ausgelegt. Der Mantel ist hinsichtlich guter Faserdispersion und Faserverbund zur zementären Matrix ausgelegt und weist eine starke Oberflächenstrukturierung auf, welche den mechanischen Verbund zur Zementsteinmatrix weiter verbessert. Einerseits wurde bei den Versuchen die Zusammensetzung des Betons, andererseits der Fasergehalt und schliesslich die Faserschnitlänge variiert. Der Grundaufbau der Fasern war identisch, weder die Polymerkombination noch die Art der Oberflächenstrukturierung wurde in den hier zusammengefassten Versuchen verändert. Zunächst wurde ein zu einem typischen Spritzbeton analoger Beton verwendet. Das Größtkorn hatte dabei einen Durchmesser von 8 mm. Der Zementgehalt war entsprechend hoch (450 kg/m^3). Dieser Beton (Beton 1) wurde nicht gespritzt, sondern konventionell gegossen. Zudem wurde ein Standardortsbeton (Beton 2) mit einem Größtkorn von 32 mm und einem Zementgehalt von 300 kg/m^3 verwendet (Tabelle 1). Es wurden vier verschiedene Betonmischungen hergestellt (Tabelle 2). Gemischt wurde in einem 250 l Mischer. Die Messung ergab Ausbreitmaße (EN 12350 (2009), Teil 5) zwischen 45 und 55 cm.

Zur Analyse des Nachbruchverhaltens der faserverstärkten Betone wurden im Alter von 28 Tagen Biegezugversuche nach EN14651 (2005) durchgeführt. In diesem Versuch werden Balken der Dimension $150 \times 150 \times 550 \text{ mm}^3$ mittig eingekerbt (Kerbtiefe 25 mm). Die Prüfanzordnung entspricht einem 3-Punkt Versuch. Neben der Proportionalitätsgrenze $f_{ct,L}^f$ werden

die residuellen Biegezugfestigkeiten bei den Durchbiegungen ($\delta_1= 0,47$ mm (CMOD₁= 0,5 mm), $\delta_2= 1.32$ mm (CMOD₂=1,5 mm), $\delta_3= 2.17$ (CMOD₃= 2,5 mm) und $\delta_4= 3.02$ mm (CMOD₄= 3,5 mm) ermittelt.

Zudem wurde das Arbeitsvermögen in einem Quadratplattenversuch nach SIA 162/6 [4] an Platten der Dimension 600x600x100 mm³ ermittelt. Dieses Prüfverfahren ist hinsichtlich Prüfkörperdimensionierung, Lastaufbringung, sowie Messwerteerfassung gleichwertig zur EN 14488-5 (2006).

Der Rechenwert der wirksamen Biegezugfestigkeit f_{ctf} ergibt sich zu:

$$f_{ctf} = \frac{3 \int_0^{w_1} F dw}{n h_0^2 l_f} \quad (1)$$

mit $w_1 = (0.07n - 0.10) * l_f$
 h_0 : Prüfkörperhöhe (100 mm)
 n : Rissanzahl
 l_f : Faserlänge

Der Rechenwert der Bruchenergie G_f wird ermittelt als:

$$G_f = \frac{\int_0^{4w_1} F dw}{3n h_0^2} \quad (2)$$

Die Energieabsorption (in Joule) bis zu einer Durchbiegung von 25 mm wird gemäß der EFNARC Richtlinie [5] (analog zur EN 14488-5) durch Integration der Last-Durchbiegungskurve zwischen der Durchbiegung 0 und 25 mm ermittelt.

Tab. 1: Verwendete Betonzusammensetzungen

	Sand 0..4mm [kg/m ³]	Kies 4..8mm [kg/m ³]	Kies 8..16mm [kg/m ³]	Kies 16..32mm [kg/m ³]	Zement CEM I 42,5 N [kg/m ³]	Wasser [kg/m ³]	w/z	FM*) [kg/m ³]
Beton 1	1156	544	-	-	450	202,5	0,45	4,5
Beton 2	640	320	340	700	300	150	0,5	1,5

*)Fließmittel

Tab. 2: Verwendete Faserbetonmischungen

	Beton	Fasertyp	Faserlänge	Fasergehalt
Mischung 1	Beton 1	Bico 1	50 mm	1,0 Vol.-%
Mischung 2	Beton 1	Bico 1	50 mm	0,5 Vol.-%
Mischung 3	Beton 2	Bico 1	50 mm	0,5 Vol.-%
Mischung 4	Beton 1	Bico 2	30 mm	0,5 Vol.-%

Das Kriechverhalten wurde einerseits in einer Lastanordnung analog zum 4-Pkt.-Biegezugversuch nach EN 14488-3 (2006) durch Aufbringen einer Dauerlast ermittelt. Dabei wurden aber balkenförmige, mit einer Kerbe der Tiefe 25 mm, versehene Prüfkörper der Dimension $150 \times 150 \times 550 \text{ mm}^3$ analog EN 14651 (2005) verwendet. Die Stützweite betrug 500 mm. Die Kriechversuche erfolgten im Konstantklima bei $20 \text{ °C}/70 \text{ \%RF}$.

Die Untersuchungen erfolgten im gerissenen Zustand: Durch Vorbelastung wurde eine dem Gebrauchszustand entsprechende Anfangsrissbreite erzeugt. Die Probekörper wurden im Alter von ca. 90 Tagen zunächst dehnungsgeregelt gemäss EN 14651 (3-Pkt.-Biegezug) bis zum Erreichen der Grenzdurchbiegung belastet und danach bis zu einer Verformung von 0,5 mm weggesteuert weiterbelastet. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde in Abweichung von der Norm konstant auf 0,24 mm/min festgesetzt. Für die Dauerbelastung wurden die Balken in Belastungsrahmen eingebaut. Die Lastaufbringung erfolgte bei geringen Lasten mittels Bleiplatten, bei höheren Lasten durch spezielle Gasdruckkolben. Ein Vergleich der beiden Belastungsarten zeigte keine prinzipiellen Unterschiede. Es wurden jeweils drei Prismen mit gleicher Grundlast belastet (Bild 1 und 2). Bei der Berechnung der effektiven Dauerlasten wurden die Gewichte der jeweils darüber liegenden Prismen berücksichtigt. Die Rissöffnungsweite wurde zunächst vor der Dauerlastbelastung $\text{CMOD}(0)$ und nach dem Einbau der Prismen zuerst einmal pro Woche, dann alle zwei Wochen gemessen $\text{CMOD}(t_x)$. Die Messung erfolgte über aufgeklebte Messbolzen auf der Höhe der maximalen Tiefe der Kerbe. Die Messdistanz betrug 50 mm.

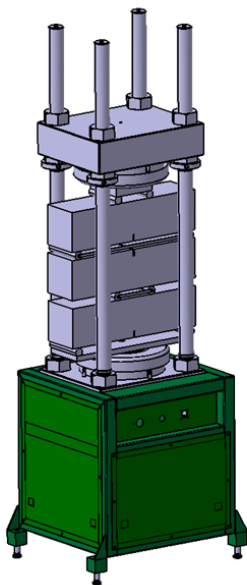


Bild 1 und 2: Prüfanordnung der Kriechversuche an Balken

In Ergänzung zu den Kriechversuchen an Prismen wurden Dauerlastversuche an Quadratplatten durchgeführt.

Die Untersuchungen erfolgten ebenfalls im gerissenen Zustand. Durch Vorbelastung wurden dem Gebrauchszustand entsprechende Anfangsrissweiten erzeugt. Die Probekörper der Dimension $600 \times 600 \times 100 \text{ mm}^3$ wurden im Alter von ca. 90 Tagen zunächst verformungsgeregelt (SIA 162/6) bis zum Erreichen der Grenzdurchbiegung von 2 mm belastet und unmittelbar danach kontrolliert entlastet. Für die Dauerbelastung wurden die Quadratplatten

in Belastungsrahmen eingebaut und dann dauerhaft unter konstanter Last via Gasdruckkolben belastet. Die aufgebrachte Last wurde mittels Druckmanometern kontrolliert und bei Bedarf nachjustiert. Das Auflager war quadratisch und hatte eine Kantenlänge von 500 mm. Die Durchbiegung wurde zunächst gleich nach dem Einbau ohne Last $\delta(0)$ und dann zuerst einmal pro Woche, später alle zwei Wochen, an vier verschiedenen Positionen, jeweils die Verschiebung eines Kantenrandes des Kraftauflagers widerspiegelnd, gemessen $\delta_i(t_x)$. Die Kriechversuche erfolgten im Konstantklima bei 20°C/70%RF.

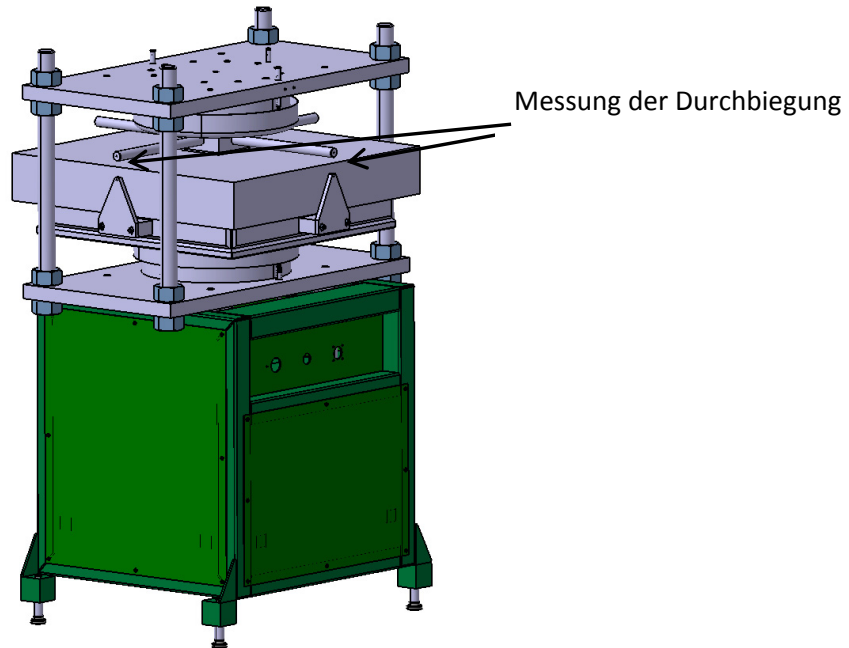


Bild 3: Prüfanordnung der Kriechversuche an Quadratplatten

3. Ergebnisse

3.1 Festigkeiten

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Balkenbiegeversuche im Alter von 28 Tagen aufgelistet. Es ergeben sich bedeutende Nachbruchfestigkeiten. Ein gewisser Anstieg der Nachbruchfestigkeiten mit zunehmender Durchbiegung ist zu beobachten. Infolge des sehr großen Größtkorns von 32 mm (deutlich grösser als bei typischen Referenzbetonen nach EN 14845-1) ergeben sich beim Ortbeton (Mischung 3) etwas geringere Werte. Der schmale Belastungsquerschnitt erweist sich bei dieser Prüfung für diesen Beton als ungünstig. Wenige ungünstig liegende Körner können demnach zu einem deutlichen Festigkeitsabfall führen. Generell ist eine Prüfung entsprechend dem Plattenversuch für Faserbeton wohl aussagekräftiger, wird doch Faserbeton kaum zur Produktion von Balken, sondern meistens zur Herstellung von Wänden, Böden oder anderen plattenartigen Elementen verwendet. Auch bei flächigen Spritzbetonanwendungen macht die Balkenprüfung wenig Sinn. Die zu erwartende Lastverteilung entspricht eher der zentralen Belastung im Quadratplattenversuch. In Tabelle 4 und Bild 4 sind die Resultate der Quadratplattenversuche dargestellt. Dabei wird deutlich, dass nach dem ersten Bruch (Versagen des Betons) eine teils deutliche Laststeigerung durch Faserzugabe erreicht werden kann. Dies trifft insbesondere auch auf Durchbiegungen zu, welche grösser sind als die bei den Kriechversuchen gewählte Anfangsdurchbiegung von 2 mm.

Tab. 3: Festigkeiten (Mittelwerte von 3 Prüfkörpern) nach EN 14651

	Bruchlast	$f_{ct,L}^f$	$F(\delta_1)$	$f_{R,1}$	$F(\delta_2)$	$f_{R,2}$	$F(\delta_3)$	$f_{R,3}$	$F(\delta_4)$	$f_{R,4}$
Bezeichnung	(LOP) [kN]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]
Mischung 1	20,7	6,65	9,3	2,99	13,3	4,28	14,6	4,70	15,1	4,84
Mischung 2	18,9	6,08	4,7	1,50	6,1	1,97	6,7	2,14	6,8	2,18
Mischung 3	18,5	5,88	4,3	1,35	4,6	1,48	4,9	1,57	4,9	1,56
Mischung 4	20,9	6,66	3,7	1,17	4,7	1,49	4,7	1,50	4,3	1,38

Tab. 4: Festigkeiten Quadratplatten nach SIA 162/6

Bezeichnung	Dosierung	Länge	f_{ctf}	G_f	Bruchenergie EFNARC 25 mm
	[kg/m ³]	[mm]	[N/mm ²]	[N/m]	[J]
Mischung 1	9,1	50	1,16	14529	1606
Mischung 2	4,55	50	0,68	9696	952
Mischung 3	4,55	50	0,49	5082	616

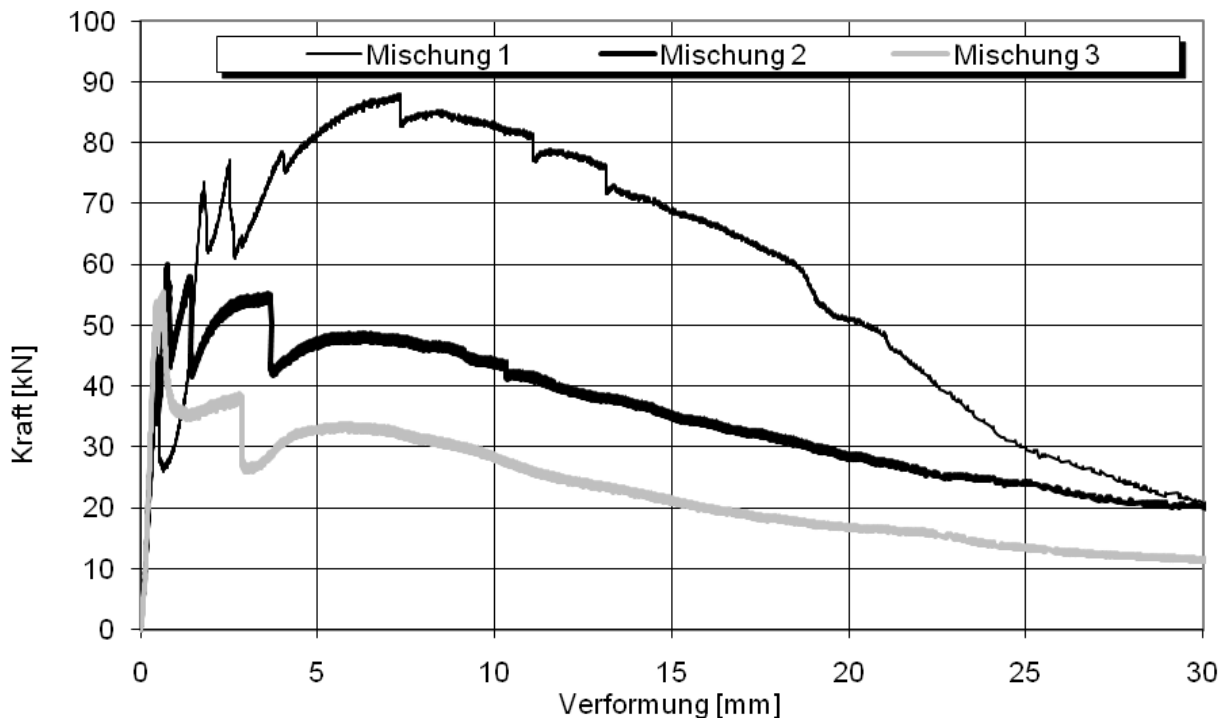


Bild 4: Arbeitsvermögen von Quadratplatten SIA 162/6

3.2 Kriechversuche an Balken

In Bild 5 und 6 ist das Verformungsverhalten von Prismen unter Dauerlast in Abhängigkeit verschiedener Parameter wiedergegeben. Angegeben sind die relativen Lastniveaus in Prozent der residuellen Last (des entsprechenden Prüfkörpers) bei der Durchbiegung von 0,5 mm, sowie die der aufgetragenen Last entsprechende residuelle Kriechbiegezugfestigkeit (in N/mm²). Bei zwei Prüfkörpern der Mischung 2 wurde nach 57 Tagen die aufgetragene Last verdoppelt (von 45 % auf 91 % und von 25 % auf 51 %).

Bislang (Stand 400 Tage) sind nur geringfügige, kontinuierliche Verformungszunahmen zu beobachten. Lastniveaus bis 91 % (bzw. 1,29 N/mm²) bei Betonmischung 2 werden dauerhaft gehalten. Die Verformungen erreichen keine kritischen Maße und scheinen sich zu stabilisieren. Dabei waren die gewählten Lastniveaus teilweise weit höher als die bei maximaler Ausnutzung in der DAfStb-Richtlinie [6] vorgesehenen Lasten. In einem separaten Versuch nach DAfStb-Richtlinie (4-Pkt- Belastung, gleich große Prismen, ohne Kerbe) wurde beispielsweise für die Mischung 2 eine mittlere Nachrissbiegezugfestigkeit $f_{\text{cfik,L2}}^r$ von 1,92 N/mm² ermittelt. Daraus ergibt sich ein charakteristischer Wert der Nachrissbiegezugfestigkeit $f_{\text{cfik,L2}}^r$ von 0,98 N/mm², was der Leistungsklasse L2 = 0,9 entspricht. Unter Berücksichtigung der in der DAfStb-Richtlinie verwendeten Abminderungsfaktoren lässt sich ein maximaler Ausnutzungsgrad von 41% errechnen [7].

Es kann festgestellt werden, dass eine kürzere Schnittlänge der Fasern das Kriechverhalten nicht entscheidend mitbeeinflusst. Durch die oberflächliche Strukturierung der Fasern ist das Verbundkriechen also weitestgehend reduziert. Dies zeigte sich auch bei der Ermittlung der residuellen Festigkeiten nach mehr als einjähriger Dauerbelastung einzelner Prüfkörper. Es wurden analoge Werte zu den in Tabelle 3 aufgeführten Daten gemessen.

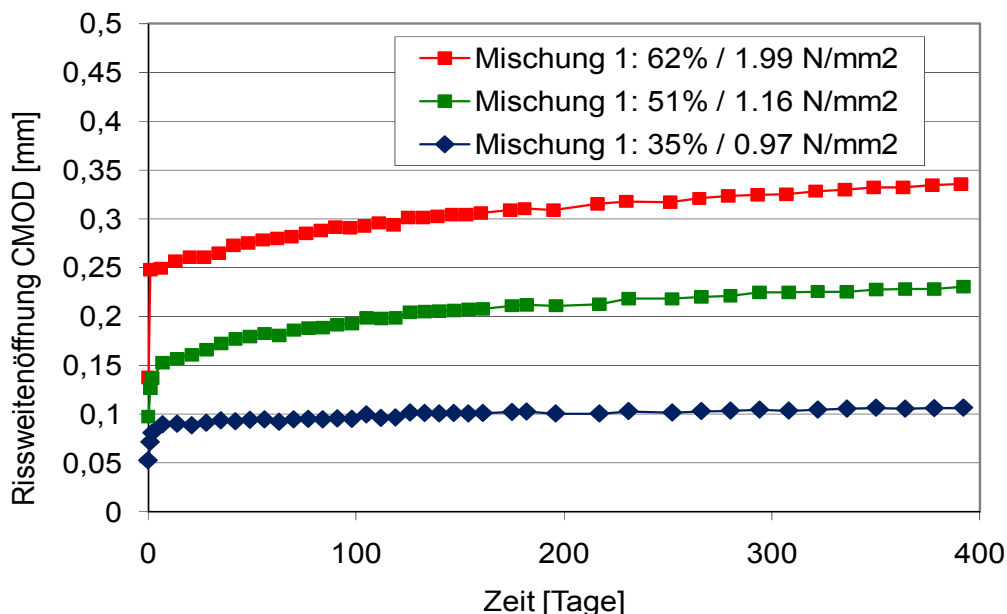


Bild 5: Kriechverhalten an Balken von Spritzbeton mit 1,0 Vol.-% Fasern

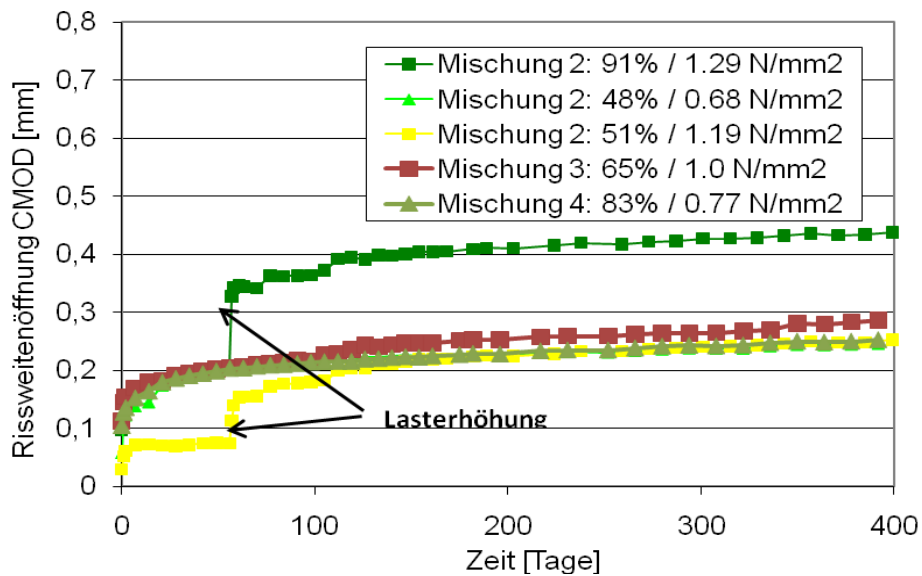


Bild 6: Kriechversuche an Balken: Fasergehalt 0,5 Vol.-%

3.3 Kriechversuche an Quadratplatten

Das Verformungsverhalten von Quadratplatten unter Dauerlast ist in Bild 7 dargestellt. Mit Ausnahme einer Erhöhungsstufe nach ca. 170 Tagen, welche auf eine leicht überhöhte Nachjustierung der Lasten zurückzuführen ist, nimmt die mittlere Durchbiegung zwar kontinuierlich, aber nur moderat zu. Zu beachten ist dabei, dass die bei Mischung 1 aufgebraachte Last beispielsweise mehr als 70 % der Last beim ersten Bruch (Mittelwerte bei ca. 55 kN) der Quadratplatte entspricht (Bemerkung: die im Bild 7 angegebene Belastungsgrade beziehen sich auf die Lasten bei der Grenzdurchbiegung von 2 mm). Bei zentrischer Belastung flächiger Elemente lassen sich also sehr hohe Lasten dauerhaft halten.

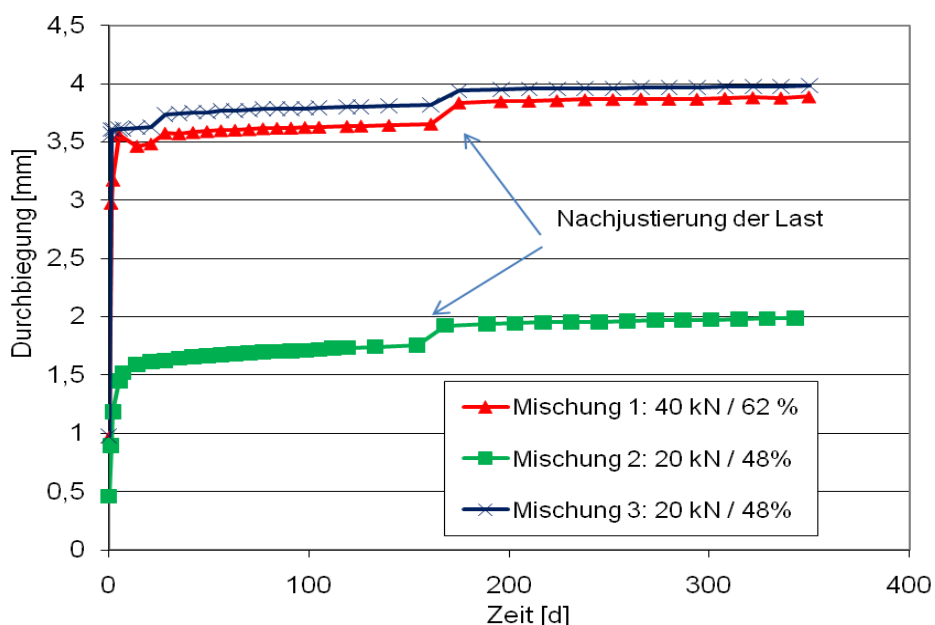


Bild 7: Kriechverhalten von Quadratplatten unter Dauerlast

4. Zusammenfassung

Die hier untersuchten, Oberflächen-strukturierten Bikomponentenfasern zeigen unter Dauerlast eine kontinuierliche leichte Zunahme der Rissweiten. Bei Lastniveaus zumeist oberhalb der bei Faserbeton vorgesehenen Ausnutzungsgrade war die Rissweitzunahme auch nach 400 tägiger Dauerbelastung jedoch sehr moderat und nicht kritisch.

Das Verbundkriechen erweist sich infolge der Oberflächenstrukturierung als stark reduziert.

Im Quadratplattenversuch werden residuelle Lasten bis mehr als 60 % der Traglast (Traglast bei Durchbiegung 2 mm) dauerhaft (bisher 340 Tage) mit moderaten Verformungszunahmen gehalten. Mit einer Faserdosierung von 1 Vol.-% gelingt es, ca. 70 % der Last des ersten Bruches dauerhaft zu halten.

5. Literatur

- [1] Roesler, J. R.; Altoubat, S. A.; Lange, D. A.; Rieder, K.-A.; Ulreich, G.:
Effect of synthetic fibers on structural behavior of concrete slabs on ground. *ACI Materials Journal*, 2006, Vol.103, No. 1, pp. 3–10.
- [2] Roesler, J. R.; Lange, D. A.; Altoubat, S. A.; Rieder, K.-A.; Ulreich, G.:
Fracture behavior of plain and fiber-reinforced concrete slabs under monotonic loading. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, Vol. 16, Sept./Oct., pp.452–460.
- [3] Kaufmann J.; Lübben J.; Schwitter E.:
Mechanical reinforcement of Concrete with bi-component Fibers. *Composite Part A: Applied Science and manufacturing*, 38 (2007),1975-1984.
- [4] Schweizer Norm:
SIA162/6, Stahlfaserbeton. 1999.
- [5] EFNARC:
Guidelines to the Sprayed Concrete Specifications. 2000.
- [6] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton:
Richtlinie Stahlfaserbeton. Ausgabe März 2010.
- [7] Gossila U.; Rieder K.-A.:
Zeitabhängiges Verhalten von Makrokunststofffaserbeton und dessen Einfluss auf die Bemessung von Industriefußböden. *Beton- und Stahlbetonbau Heft 2*, S.76-87, (2009).

Zu den Autoren

Dr. Josef Kaufmann

Studium Physik an der ETH Zürich, Dissertation ETH Lausanne. Seit 1994 EMPA Materials Science & Technology.

josef.kaufmann@empa.ch

Dipl. Ingenieur FH Robert Bader

Studium an der Biberach University of Applied Sciences.

Brugg Contec AG seit 2011.

robert.bader@bruggcontec.com

Dipl. Ingenieur FH Mario Manser

Studium Bauingenieurwesen an der FHNW Brugg-Windisch.

Brugg Contec AG seit 2005.

mario.manser@bruggcontec.com