

**Entwicklung von Cellulosefaser-Leichtbeton  
und Untersuchung des bruchmechanischen  
Verhaltens**

**Developing a cellulose-fibre lightweight concrete  
and investigating its mechanical fracturing  
properties**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden  
vorgelegte Dissertation von

Thomas Sebastian Thiel (M.Sc.)  
aus Görlitz

Dresden 2016

## Kurzfassung

Im Zentrum der vorliegenden Arbeit steht ein zementgebundener Leichtbeton auf der Basis von aus Altpapier herausgelösten Cellulosefasern; hierfür wird im Folgenden die Bezeichnung CFLC (*Cellulose-Fibre Lightweight Concrete*) verwendet. Die Intention zur Untersuchung dieses mitunter auch als *Papercrete* bezeichneten und bislang nur verhältnismäßig wenig erforschten Materials beruht insbesondere darauf, dass von einer Kombination eines leicht verfügbaren pflanzlichen Faserstoffs mit einem mineralischen Bindemittel eine Reihe positiver Wechselwirkungen erwartet werden darf.

Am Anfang stehen Erläuterungen zur Spezifik dieses Materials und eine Einordnung in den Kontext der üblichen Leicht- und Faserbetone. Nach einer Darstellung und Diskussion der bisher vorhandenen Erkenntnisse erfolgt eine Präzisierung der Aufgabenstellung.

Anschließend werden die Besonderheiten von aus Altpapier herausgelösten Cellulosefasern vorgestellt und die charakteristischen Eigenschaften dieser Fasern beschrieben. Es folgen weiterhin Betrachtungen zur Problematik des Faseraufschlusses. In diesem Zusammenhang werden Wege aufgezeigt, wie dieser Prozess in betontechnologischer Hinsicht labor- und großtechnisch umgesetzt werden kann. Im Hinblick auf den Mischungsentwurf erfolgt eine Vorstellung von Methoden zur Bestimmung der für die Stoffraumrechnung relevanten Faserkennwerte.

In einem weiteren Schritt werden die Methodik und der entwickelte Algorithmus für einen zielgerichteten Mischungsentwurf erläutert sowie eine Variante zur technologischen Klassifizierung von CFLC-Grundtypen vorgestellt. Nach Betrachtungen zur Auswirkung einer Cellulosefaserzugabe auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften wird eine auf die Trockenrohichte hin ausgerichtete Rezepturentwicklung anhand eines Beispiels demonstriert.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen hinsichtlich der durch die Faserzugabe deutlich veränderten Frischbetoneigenschaften des CFLC sowie die Auswirkungen auf den Mischvorgang und die Einbautechnologie erläutert. Diesbezüglich erfolgt auch eine Darstellung der Erkenntnisse, die bei großtechnischen Versuchen mit dem CFLC in zwei Betonwerken gewonnen wurden.

Des Weiteren werden die Ergebnisse aufgezeigt, die während begleitender Untersuchungen zum Erhärtungs- und Trocknungsprozess erzielt wurden. Dabei werden die strukturellen Auswirkungen der Hydratation des Zementes und der Trocknung beschrieben sowie die Aspekte erörtert, die im Zusammenhang mit der durch die Cellulosefaserzugabe verbundenen Erhärtungsverzögerung und den möglichen Gegenmaßnahmen stehen. Weiterhin werden auch Betrachtungen zur Effektivität einer Festigkeitssteigerung durch die Zugabe von Mikrosilika sowie zu den mit dem Trocknungsprozess einhergehenden Schwindverkürzungen durchgeführt.

Schließlich erfolgt eine Darstellung der bei den Untersuchungen zu den Festbetoneigenschaften gewonnenen Erkenntnisse. Dabei werden die wesentlichsten mechanischen Kennwerte sowie das hygrische und wärmetechnische Verhalten unter Einbeziehung von Porositätskennwerten beleuchtet. Weiterhin erfolgt eine Beurteilung der Dauerhaftigkeit auf der Basis von Zeitraffer- und Auslagerungsversuchen. Das durch die Anwesenheit von Cellulose bestehende Risiko gegenüber einem biologischen Angriff wird dabei durch die Übertragung eines für Holzwerkstoffe üblichen Verfahrens bewertet.

Einen wesentlichen Bestandteil dieser Arbeit stellen die bruchmechanischen Untersuchungen am CFLC dar. Nach einer Darstellung der verwendeten Ansätze und Kennwerte werden Überlegungen zur modellhaften Beschreibung des Verformungs- und Rissverhaltens erläutert. Weiterhin werden Möglichkeiten der optischen Erfassung von Bruchprozessen bzw. der mikroskopischen Untersuchung von Bruchflächen dargelegt. Dabei werden geeignete Wege zur Bestimmung geometrischer Kennwerte aufgezeigt. Das Versuchsprogramm zu den bruchmechanischen Untersuchungen konzentriert sich auf haufwerksporige CFLC-Zusammensetzungen im Bereich des Infraleichtbetons. Um eine Einordnung der ermittelten Ergebnisse vornehmen zu können, erfolgt die Einbeziehung von Porenbeton aus einem vergleichbaren Rohdichtebereich. Die gewonnenen Erkenntnisse basieren schwerpunktmäßig auf einaxialen Zugversuchen; mit in die Betrachtungen einbezogen werden allerdings auch Ergebnisse, die bei parallel durchgeführten Biege- und Druckversuchen gewonnen wurden.

Zur Erfassung des Verformungs- und Bruchverhaltens des CFLC wird ein Ansatz auf der Basis des klassischen Wachstumsmodells formuliert. Auf der Grundlage der experimentellen Untersuchungen erfolgt letztlich eine Charakterisierung des Materialverhaltens durch die Beschreibung des typischen Kurvenverlaufs (Masterkurve). Darüber hinaus werden Betrachtungen zur Korrelation zwischen den bruchmechanischen Kennwerten und den geometrischen Texturkennwerten der Bruchflächen angestellt. Die anschließende Diskussion über die Ursachen der Strukturänderungen und den Rissbildungsprozess erfolgt unter Einbeziehung eines modellhaften Ansatzes zur Beschreibung der inneren Kontaktfläche zwischen den CFLC-Partikeln bei einer haufwerksporigen Situation.

Das enorme Wasserspeichervermögen der Cellulosefasern hat zur Folge, dass die CFLC-Zusammensetzungen von jenem Wasseranteil dominiert werden, welcher für den Faseraufschluss benötigt wird. Eine Steigerung des Cellulosefaseranteils im Gesamtgemisch hat somit automatisch einen Anstieg der Porosität des trockenen Materials zur Folge, wodurch die ausgeprägte Abhängigkeit fast aller Kennwerte vom Cellulosefaseranteil resultiert. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften wurde festgestellt, dass der Bewehrungseffekt der Fasern nicht in der Lage ist, die Festigkeitseinbußen infolge des Ansteigens der Porosität zu kompensieren. Eine Cellulosefaserzugabe hat aber generell eine positive Auswirkung auf die Duktilität und bewirkt zudem die Entstehung einer nennenswerten Tragfähigkeit nach einer begonnenen Makrorissbildung.

## Abstract

The present work addresses a cement-bound lightweight concrete incorporating cellulose fibres extracted from waste paper; use is hereinafter made of the acronym CFLC (cellulose-fibre lightweight concrete) to describe the resultant product. The main case for investigating this, as yet, comparatively under-researched material, also commonly referred to as “papercrete”, is that the act of combining readily available fibrous plant material with a mineral binding agent can be expected to yield a number of positive interactions.

The first step involves elucidating the material’s specific characteristics and contrasting it with other lightweight, fibre-based concretes. Following exposition and discussion of insights arrived at in past studies, the precise nature of the task in hand is defined.

The distinguishing features and characteristic properties of cellulose fibres extracted from waste paper are then set out and this is followed by a number of observations on the problems involved in pulping such fibres. Means of implementing the process both in the laboratory and during the full-scale engineering of concrete are also pointed up here. Methods of determining those fibre characteristics that are of relevance to the material volume calculation to be performed in respect of the mix design are similarly presented.

In a further step, the methodology adopted and algorithm developed for a target-responsive mix design are elucidated and a system for the technological classification of basic types of CFLC is presented. Following deliberation on how adding cellulose fibres affects the properties of fresh and hardened concrete, a formulation geared towards a specific dry bulk density is demonstrated citing an illustrative example.

Thereafter, the results of exhaustive studies regarding the significant changes to the properties of fresh CFLC brought about by adding fibres and the implications these have for the mixing process and placing technology are explained. The findings arrived at during full-scale trials with CFLC in two concrete works are also set out in this context.

Likewise detailed are the results gained from accompanying studies of the hardening and drying process. The section provides a description of the structural consequences of hydrating and drying cement before addressing aspects with a bearing on the delay in hardening brought about by adding cellulose fibres as well as on potential countermeasures. There is also analysis here of whether adding microsilica occasions any increase in mechanical strength, consideration similarly being given to levels of shortening through shrinkage during the drying process.

The work concludes by setting out the findings arrived at when studying the properties of the hardened concrete. Light is shed on the material’s key mechanical characteristics as well as on its hygric and thermic behaviour inclusive of porosity characteristics. Time-lapse and precipitation tests are then run to assess its durability. The risk of biological attack arising from the presence of cellulose is gauged adopting a standard procedure for timber materials.

Mechanical fracturing tests conducted on CFLC are a key constituent of this study. Following delineation of the approaches and characteristics adopted, consideration is given to depicting deformation and crack behaviour in model form. Means of recording fracture processes optically or of subjecting fracture faces to microscopic examination are additionally aired, in the process pointing up suitable ways of determining geometric characteristics. The fracture test programme focuses on no-fines CFLC compositions in the range of infra-lightweight concrete.

With a view to contextualising the results obtained, testing is extended to cover autoclaved aerated concrete with a comparable bulk density range. The findings arrived at derive primarily from uniaxial tensile-strength tests, though results gained from bending and compression tests run in tandem are likewise factored into appraisals.

An approach based on the conventional growth model is formulated for the purpose of establishing the deformation and fracture behaviour of CFLC. Drawing on experimental studies, finally, the material's behaviour is characterised by describing its typical curve pattern (master curve). Consideration is additionally given to the correlation between the fracture characteristics and geometric texture characteristics of fracture faces. The ensuing discussion of what causes the structural changes as well as of the crack-formation process is conducted adopting a model-based means of describing the inner contact faces between CFLC particles under no-fines conditions.

The enormous propensity of cellulose fibres for storing water results in CFLC compositions being dominated by the water fraction required to pulp them. Increasing the fraction of cellulose fibres in the total mix thus automatically causes the porosity of the dry material to rise, which in turn explains the pronounced dependence of almost all characteristics on the proportion of cellulose fibres in the mix. Having regard to the material's mechanical properties, it was ascertained that the fibres' reinforcing moment was insufficient to compensate for losses of strength due to the increase in porosity. Adding cellulose fibres nevertheless has a positive impact on ductility whilst also being conducive to a noteworthy capacity for bearing loads following the onset of macrocracking.