



Doctoral Thesis

Development of novel low-clinker high-performance concrete elements prestressed with high modulus carbon fibre reinforced polymers

Author(s):

Lämmlein, Tobias D.

Publication Date:

2019

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000344249> →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. – 25890

**Development of novel low-clinker high-performance
concrete elements prestressed with high modulus
carbon fibre reinforced polymers**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
TOBIAS DOMINIK LÄMMLEIN

MSc ETH ME, ETH Zurich

born on 20.09.1985
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Pietro Lura
Dr. Giovanni P. Terrasi
Prof. Dr. Janet M. Lees
Prof. Dr. Guillaume Habert

2019

Abstract

In this thesis, new ideas for reducing the environmental impact and, at the same time, increasing the mechanical performance of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) prestressed high performance concrete (HPC) elements were studied. This involved in particular, the initial characterization of sand coated ultra-high-modulus (UHM)-CFRP tendons and the assessment about their suitability for prestressing applications, the development of novel low clinker high performance concretes (LCHPCs) and the final proof of concept on structural level with the development of a 2nd generation of UHM-CFRP LCHPC beam elements.

At first, the sand coated UHM-CFRP prestressing tendons were investigated on their bond to concrete. With the aid of a combined experimental and numerical approach, employing X-ray CT, scanning electron microscopy (SEM) and the finite element software Abaqus 6.14, a numerical model could be formulated to describe the tendon pull-out behaviour up to failure. The tendon draw-in behaviour was significantly affected by the longitudinal stiffness of the CFRP tendon. In contrast, the experimentally tested ultimate bond strength between sand-coated tendon and concrete was only dependent on the chosen sand-coating and found independent from the tendon's stiffness.

Secondly, starting from an industry reference HPC, novel LCHPCs were developed by substituting significant amounts of cement with limestone filler, metakaolin and silica fume. Three LCHPC recipes were developed with clinker replacement levels of 54, 58 and 70 %. All three recipes reached a compressive strength between 77 MPa and 88 MPa. Due to their low cement content, they showed less shrinkage and creep in comparison to a reference HPC. Based on these results a finite element model was developed in Abaqus 6.14, considering concrete shrinkage and creep, to estimate the performance of the novel LCHPCs and the UHM-CFRP prestressing tendons in a fictitious prestressing application. This model showed that high longitudinal stiffness of the UHM-CFRP tendons will lead to increased prestress losses. Low shrinkage and creep of LCHPCs, in contrast, were predicted to contribute to a high remaining prestress level the fictitious prestressed elements.

Thirdly, the gained knowledge on LCHPCs and UHM-CFRP prestressing tendons was combined and three meter long UHM-CFRP prestressed LCHPC beam elements were designed. In these elements, the prestress loss over time was experimentally studied by the aid of fibre optic sensors placed inside the CFRP-prestressing tendons. Further, the beams were tested in 4-point bending and their structural behaviour was analysed by a digital image correlation system (DIC). The experimental results confirmed the previously developed numerical model. UHM-CFRP tendons showed much higher prestress loss over time. In the four point bending tests, UHM-CFRP tendons contributed to a significantly reduced beam deflection in particular when the beam was loaded in the cracked state. The LCHPCs showed no significant effect during the 4-point bending tests performed 28 days after casting. This confirmed the expectations and showed that these recipes are ready for application in CFRP-prestressed concrete elements.

This work was concluded by performing a life cycle assessment (LCA) on the new beam elements using the measures of global warming potential (GWP), cumulative energy demand (CED) and ecological scarcity method (UBP). In comparison to a reinforced concrete structure

savings of 80% for the CED measure and even up to 90% for the GWP and UBP measure could be reached by using CFRP-prestressed LCHPC beam elements. A direct application of LCHPCs as replacement for HPC would lead to savings between 25% and 50% for recipes containing metakaolin and up to 55-70% for a recipe which used only limestone and silica fume as cement replacement.

The results of this research could be transferred without large adaptations into praxis and would significantly help to reduce the CO₂ footprint of future infrastructure. In addition, this thesis sets the basis for the use of UHM-CFRP prestressing tendons in prestressed concrete and developed the first LCHPC recipes for applications in CFRP prestressed structural concrete elements.

Zusammenfassung

Diese Arbeit behandelt neue Ansätze zur Verbesserung der strukturellen Tragfähigkeit von Kohlenstofffaser vorgespannten Spannbetonelementen. Darüber hinaus hat diese Arbeit das Ziel die Umweltbelastung dieser Elemente in Form von CO₂ Emissionen zu senken und somit einen Beitrag für eine nachhaltige Schweiz zu leisten. Um dies zu erreichen wurden hochsteife sandbeschichtete Vorspanndrähte aus Kohlenstofffaser verstärkten Kunststoffen (UHM-CFK) ausgewählt und neue Hochleistungsbetone mit einem geringen Anteil an Zementklinker entwickelt. Die Eigenschaften der neuen Materialien wurden anschliessend verknüpft, vorgespannte Tragbalken der neusten Generation entwickelt und deren Leistungsfähigkeit nachgewiesen.

Begonnen wurde diese Arbeit damit die sandbeschichteten UHM-CFK Spanndrähte zu charakterisieren um anschliessend ihre Verbundeigenschaften zu hochfestem Betonen zu bestimmen. Hierzu wurden numerischen Methoden (Finite Elemente Methode) mit experimentellen Auszugsversuchen kombiniert. Unter der Zuhilfenahme von Röntgen Computertomographie und Rasterelektronenmikroskopie wurde das Drahtauszugsverhalten bis zum Verbundversagen analysiert und beschrieben. Es zeigte sich, dass das Drahtauszugsverhalten signifikant von der Längssteifigkeit des UHM-CFK Spanndrahtes abhängt. Im Gegensatz dazu war die maximale Verbundfestigkeit zwischen dem sandbeschichteten Spanndraht und dem Beton nur von der gewählten Sandbeschichtung abhängig, nicht aber von der Spanndrahtsteifigkeit.

Parallel dazu wurden, ausgehend von einem industriellen Referenzbeton, neue Hochleistungsbetone entwickelt in denen grosse Teile des Zements durch Kalkstein, Metakaolin und Silikastaub ersetzt wurden. Hierbei konnten drei neue Rezepturen entwickelt werden die eine Zementreduktion von 54, 58 und 70% aufweisen. Die gemessene Druckfestigkeit der drei Mischungen lag zwischen 77 und 88 MPa was sie als „hochfest“ klassifiziert. Auf Grund des stark reduzierten Zementanteils zeigten sich diese Mischungen zudem ein deutlich verbessertes Schwind- und Kriechverhalten. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Finite-Elemente-Modell entwickelt, welches die mechanischen Eigenschaften der neuen Spanndrähte, aber auch der Betone sowie zusätzlich deren Schwind und Kriecheigenschaften berücksichtigt. Mit diesem Modell war es möglich abzuschätzen welche Auswirkungen die Verwendung der beiden neuen Materialien in einem fiktiven vorgespannten Element haben würde. Das Model zeigte das durch die hohe Längssteifigkeit der UHM-CFK Spanndrähte grosse Vorspannungsverluste zu erwarten sind. Durch die neuen Betonmischungen konnten diese Vorspannungsverluste jedoch teilweise wieder kompensiert werden. Das macht die neuen Betone insbesondere für Anwendungen in vorgespannten Elementen interessant.

Um die Leistungsfähigkeit der beiden neuen Materialien auch auf struktureller Ebene beurteilen zu können wurden die gewonnenen Resultate genutzt und UHM-CFK vorgespannte Biegebalken mit drei Meter Länge entworfen. Die CFK Spanndrähte in diesen Elementen waren mit faseroptischen Sensoren ausgerüstet um damit die auftretenden Vorspannungsverluste experimentell zu bestimmen. Die Balken wurden 28 Tage nach ihrer Herstellung, in 4-Punkt Biegeversuchen, belastet und ihre Tragfähigkeit ermittelt. Das strukturelle Verhalten der Balken

wurde während den Versuchen mit einem digitalen Bildkorrelationssystem (DIC) aufgezeichnet und analysiert. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung bestätigten die Erwartungen des numerischen Modelles. Wie schon das Modell, zeigten die Experimente einen erhöhten Vorspannungsverlust bei der Verwendung von UHM-CFK Spanndrähten. In den 4-Punkt Biegeversuchen konnten die UHM-CFK Spanndrähte jedoch ihre Stärken ausspielen und verminderten die Durchbiegung des Balkens im gerissenen Zustand immens. Die neuen Betone zeigten sich während den 4-Punkt-Biegeversuche unauffällig was sehr positiv zu bewerten ist. Dies bestätigte die Erwartungen und zeigt, dass diese Rezepte für ihre Verwendung in CFK-Spannbetonelementen einsatzbereit sind.

Abschliessend wurden die neuen Balkenelemente mittels einer Ökobilanz auf ihre Umweltauswirkungen und ihre CO₂ Einsparpotentiale untersucht. Dabei wurden verschiedene Bewertungskennziffern eingesetzt; ein Mass für den Beitrag zur Erderwärmung (GWP), ein Ökofaktor auf Basis der Methode der ökologischen Knappheit (UBP) und ein Mass für die enthaltene Menge an Grauenergie (CED).

Im Vergleich zu einer Stahlbetonkonstruktion konnten mit den neuen Materialien Einsparungen von 80% nach CED und sogar bis zu 90% nach GWP und UBP erzielt werden. Eine direkte Anwendung der neuen Betone im Austausch für einen herkömmlichen Hochleistungsbeton alleine würde bereits zu Einsparungen zwischen 25% und 50% für Betonmischungen mit Metakaolin führen, und sogar Einsparungen von 55-70% bei einem Rezept, bei dem nur Kalkstein und Silikastaub als Zementersatz verwendet wurden.

Die Ergebnisse dieser Forschung können ohne große Anpassungen in die Praxis übertragen werden und würden erheblich dazu beitragen, die CO₂ Bilanz zukünftiger Bauten zu reduzieren. Darüber hinaus bildet diese Arbeit die Grundlage für den Einsatz von UHM-CFK-Spanndrähten in Spannbetonanwendungen. Ebenso entwickelte diese Arbeit die ersten Hochleistungsbetone mit einem stark reduzierten Zementanteil für die Anwendung in CFK vorgespannten Betonelementen.