

Entwicklung und Charakterisierung von zementgebundenen
Baustoffen für den extrusionsbasierten 3D-Druck

**Development and characterisation of cement-based
materials for extrusion-based 3D-printing**

An der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden zur Erlangung
der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichte

DISSERTATION

Vorgelegt von

Venkatesh Naidu NERELLA, M. Sc.

aus Ongole

eignereicht am 12. November 2018

Tag der mündlichen Prüfung: 05. Februar 2019

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Viktor MECHTCHERINE

Prof. Dr. Ir. Geert DE SCHUTTER

Asst. Prof. Dr. Arnaud PERROT

Kurzfassung

3D-Druck durch computergesteuerte selektive Betonablage ist der am häufigsten verwendete Ansatz im Kontext der additiven, digitalen Fertigung im Betonbau. Dieses schalungsfreie digitale Verfahren ermöglicht ein schnelles, wirtschaftliches Bauen und bietet einen großen architektonischen Gestaltungsspielraum. Um die Möglichkeiten der 3D-Druck-Technologie im Betonbau zu entfalten, müssen die rheologischen und mechanischen Eigenschaften von Beton exakt charakterisiert werden und so eingestellt, dass sie mit aus den Prozessparametern resultierenden Anforderungen an das Material übereinstimmen. Des Weiteren ist die inhärente Anisotropie der 3D-gedruckten Elemente aufgrund der schichtweisen Herstellung und Bildung von Arbeitsfugen zu beachten. Um die aus den Prozessparametern resultierenden Anforderungen zu erfüllen und Schwachstellen zu vermeiden, sollten die druckbare Betone bestimmte, genau kontrollierbare rheologische Eigenschaften wie statische Fließgrenze und ihre zeitliche Entwicklung (aufgrund von strukturellen Aufbau- und Hydratationsreaktionen) aufweisen. Die komplexen und teilweise widersprüchlichen Materialanforderungen erfordern umfangreiche experimentelle Untersuchungen. Dies ist eine große Herausforderung, da es keine Standardtestmethoden zur Materialcharakterisierung von druckbarem Beton gibt.

Die vorliegende Arbeit fokussiert auf die Erarbeitung einer praxistauglichen Vorgehensweise zur Festlegung, Einstellung und Prüfung der erforderlichen Materialeigenschaften von frischem und erhärtendem Beton. Folgende wesentliche Anforderungen an druckbare Betone wurden untersucht: die Pumpbarkeit, die Extrudierbarkeit, die Verbaubarkeit sowie die Leistungsfähigkeit der Verbunds zwischen den Schichten. Im Ergebnis der Arbeiten wurden Methoden zur a) dehnungsbasierten Messung des Strukturaufbaus, b) rechnerischen Abschätzung von Pumpendruck, c) Inline-Charakterisierung der Extrudierbarkeit, d) praxisorientierten Ermittlung der Verbaubarkeit und e) mikro- und makroskopischen Untersuchungen der Grenzflächeneigenschaften der Schichten entwickelt. In den experimentellen Untersuchungen wurden u.a. ein Beton-3D-Drucker mit einer Exzentrerschneckenpumpe, ein Couette-Rheometer mit zylindrischer Messgeometrie, ein RAM Extruder und ein Rasterelektronenmikroskop eingesetzt, um die entwickelten druckbaren, feinkörnigen, hochfesten Betone systematisch zu charakterisieren.

Die Analysen der umfangreichen experimentellen Ergebnisse zeigten, dass der Strukturaufbau des frischen Zementleims mit dem Ansatz der konstanten effektiven Dehnung ermittelt werden kann, diese hinreichend groß sein muss, um den statische Fließgrenze zu erreichen (Strukturbruch). Die Simulationsergebnisse aus dem entwickelten CFD-Modell (computational fluid dynamics) für Virtual SLIPER (sliding pipe rheometer) korrelierten mit experimentellen Messungen. Im CFD-Modell wurde eine Gleitschicht zwischen Wandung und Kernbeton implementiert und deren Viskosität mit dem KRIEGER-DOUGHERTY-Modell berechnet. Die Gültigkeit der vorgeschlagenen Inline-Charakterisierung der Extrusion wurde durch den Vergleich der Ergebnisse von RAM-Extrusion- und Viskometerprüfungen nachgewiesen. Die spezifische Extrusionsenergie, d.h. der Energieverbrauch pro extrudierte Einheitsvolumen, stieg mit

zunehmender Fließgrenze und plastischer Viskosität des Betons. Die Parameter zur Beschreibung der Verbaubarkeit wurden mit einem praxisorientierten Ansatz identifiziert. Das vorgeschlagene Modell berücksichtigt Maschinen-, Arbeits-, Materialkosten sowie die Art des 3D-Drucks. Die Eigenschaften des Verbunds zwischen den Schichten hängen stark vom Zeitintervall zwischen der Ablage der Schichten, der Bindemittelzusammensetzung und der Porosität/Rauheit des Substrats ab. Eine ungünstige Parameterwahl kann zu fatalen Folgen führen. Der teilweise Ersatz von Portlandzement durch puzzolanische Zusatzstoffe führte zu einem schnelleren Strukturaufbau, eines verbesserten Zwischenschichtverbundes und günstigen mechanischen Eigenschaften.

Die in dieser Arbeit entwickelte Werkzeuge zur Materialcharakterisierung und die damit ermittelten Ergebnisse schaffen eine Grundlage für eine genaue und zuverlässige Materialcharakterisierung zementgebundener Materialien für den Einsatz beim 3D-Druck durch selektive Ablage.

Abstract

Extrusion-based 3D-printing — also referred to as digital construction (DC) — involves automated layer-by-layer deposition of 3D-printable cement-based materials (3PCs). DC enables speedy, economic and formwork-free construction in addition to quasi-unlimited architectural design flexibility. To ensure these advancements with DC, the rheological and mechanical properties of 3PCs need to be accurately measured and optimised according to the technological requirements. Inherently, the 3D-printed elements can reveal weak layer-to-layer interfaces, which form the weakest links in the entire structure and imply pronounced anisotropy. To fulfil the process requirements and to prevent weak bonds, the 3PCs should exhibit particular, precisely controllable rheological properties, such as static yield stress and its development in time due to structural build-up. The complex and partly contradictory material requirements of 3PCs necessitates comprehensive experimental investigations. This is a great challenge since there are no standard test methods for the material characterisation of 3PCs.

In this research, while following an overarching aim of developing high-performance 3PCs for on-site DC, the author focused on material characterisation. The primary requirements to 3PCs — pumpability, extrudability, buildability and layer-to-layer bond — are investigated. The deliverables are methods for a) strain-based measurement of structural build-up, b) computationally estimating pumping pressures, c) inline extrudability characterisation, d) practice-oriented determination of buildability test parameters and e) micro- and macroscopic insights on layer-to-layer interface properties. A 3D-printing test device with a progressive cavity pump, a concentric-cylinder COUETTE rheometer, ram extruder and scanning electron microscope were the major devices applied to systematically characterise the printability of developed fine-grained high-strength 3PCs.

The extensive analyses of the experimental results revealed that structural build-up can be characterised with constant effective strain approach. To do so, this effective strain must be high enough to ensure flow-onset. Simulation results obtained using the developed CFD (computation fluid dynamics) model called virtual Sliper (sliding pipe rheometer) correlated with experimental measurements. Lubricating layer was implemented into the CFD model and its viscosity could be calculated using KRIEGER-DOUGHERTY model. Comparative analyses of ram-extrusion and viscometer tests substantiated the significance of the proposed inline extrudability quantification method for 3PCs. The unit extrusion energy, i.e. energy consumed per extruded unit volume of 3PC, increased with increasing yield stress and plastic viscosity of 3PCs. Buildability tests' parameters were identified with a practice-oriented approach. The proposed model takes machine, labour, material costs and DC approach type into consideration. Layer-to-layer interface properties were shown to be highly sensitive to time interval between subsequent layers, binder composition, and substrate porosity/roughness. An improper choice of parameters can lead to fatal consequences. Furthermore, it was demonstrated that partial replacement of Portland cement with supplementary cementitious materials causes high structuration rate (structural build-up), superior interface

properties and satisfactory mechanical performance.

Developed test methods and the obtained results establish a basis for accurate and reliable material characterisation of cementitious materials in the context of extrusion-based digital construction.