

Understanding and mitigating plastic shrinkage in 3D-printed concrete elements

Untersuchung und Vorbeugung des plastischen
Schwindens in 3D-gedruckten Betonelementen

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichte

DISSERTATION

vorgelegt von
Slava Markin, M. Sc.

eingereicht am 02. Oktober 2023
Tag der mündlichen Prüfung: 12. Dezember 2023

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Prof. Dr.-Ing. Riaan Combrinck
Prof. Dr.-Ing. Volker Slowik

Kurzfassung

Der 3D-Druck mit Beton zählt zu den vielversprechendsten Methoden der automatisierten Bauweise. Er bietet zahlreiche Vorteile gegenüber konventionellen Bauverfahren, wie beispielsweise Kostenersparnis, erhöhte Produktivität und architektonische Gestaltungsfreiheit. In den letzten Jahren hat sich der 3D-Druck mit Beton von einer gewagten Vision zu einer zukunftsweisenden Baumethode entwickelt. In mehreren Ländern konnte die praktische Anwendbarkeit der neuen Technologie durch zahlreiche Demonstratorobjekte bewiesen werden. Um eine breite Anwendung in der Baupraxis zu ermöglichen, müssen jedoch noch einige material- und technologiespezifische Fragestellungen gelöst werden. Eine davon ist die Rissbildung der gedruckten Betonelemente aufgrund von Schwindverformungen.

Das Ausmaß der Schwindverformungen ist vor der Verfestigung der gedruckten Schichten am größten. Diese Verformungen werden als plastisches Schwinden bezeichnet. Das plastische Schwinden wird maßgeblich durch die hohe Wasserverdunstung im jungen Alter des Betons und dem dadurch folgenden inneren Spannungsaufbau in den Kapillaren hervorgerufen. Im Fall, dass die Verformungen eines Elements z. B. durch Schichtverbund oder Bewehrungselemente gehindert werden und daraus resultierende Spannungen höher als die Zugfestigkeit des Betons sind, kann es zur Rissbildung kommen.

3D-gedruckte Betonelemente sind stärker als konventionell gefertigte vom plastischen Schwinden bedroht. Dies hängt vor allem mit der schalungsfreien Bauweise und den spezifischen Zusammensetzungen der druckbaren Betonrezepturen zusammen. Risse, die durch das plastische Schwinden entstehen, können sich über den gesamten Querschnitt eines gedruckten Elements ausbreiten. Die dadurch verursachten Schäden gefährden die Dauerhaftigkeit, die Gebrauchstauglichkeit, beeinträchtigen die Ästhetik und können sogar zum Stabilitätsverlust führen. Trotz der Signifikanz dieser Problematik und der möglichen Schäden durch später auftretende Schwindarten wie z.B. Trocknungsschwinden und autogenes Schwinden, wurden bis jetzt nur wenige Studien diesem Thema gewidmet. Auch wurden die Quantifizierungs- und Vorbeugungsmethoden bisher ungenügend erforscht.

Die vorliegende Dissertation befasst sich eingehend mit den Mechanismen des plastischen Schwindens und der damit verbundenen Rissbildung bei 3D-gedruckten Betonelementen. Da es keine standardisierte oder allgemein anerkannte Methode zur Quantifizierung des plastischen Schwindens und der damit verbundenen Rissbildung von 3D-druckbaren Betonen gibt, wurde in dieser Arbeit eine zuverlässige und einfach anwendbare Messmethode entwickelt. Diese Methode ermöglicht gleichzeitig die Quantifizierung des ungehinderten und gehinderten plastischen Schwindens sowie die Ermittlung relevanter Materialeigenschaften.

Die durchgeführten statistischen Analysen bestätigten die Reproduzierbarkeit der erzielten Ergebnisse. Die Ergebnisse dieser Arbeit tragen zur Etablierung einer einheitlichen Methodologie für die Untersuchung des plastischen Schwindens und der damit verbundenen Rissbildung bei 3D-gedruckten Betonen bei.

Auf Grundlage der entwickelten Versuchsaufbauten wurden spezifische Mechanismen des plastischen Schwindens und der damit verbundenen Rissbildung von 3D-gedruckten Elementen erforscht. Die experimentellen Untersuchungen wurden durch eine numerische Simulation von der Entwicklung des Kapillarporendrucks in gedruckten Elementen ergänzt. Ein besonderes Augenmerk lag auf dem Einfluss der Schichtdicke und dem Ausmaß der Austrocknung ausgesetzten Fläche. Es wurde ein spezifisches

Abstract

Among various techniques for automated construction, 3D concrete printing (3DCP) counts as the most promising. 3D printing with concrete offers multiple advantages in cost savings, increased productivity and design freedom. 3DCP has rapidly transformed from a bold vision to a promising construction method in recent years. Manufacturing numerous demonstrators in several countries has proven the applicability of the new technology in various construction fields. Despite this, some issues still need to be resolved before 3DCP can be widely applied in construction practice. One among them is the early-age cracking of printed concrete elements due to shrinkage-induced deformations.

Volumetric contractions related to shrinkage are at their highest before the solidification of 3D-printed layers. This type of shrinkage is attributed to the plastic shrinkage. Plastic shrinkage occurs due to the extensive water loss followed by the rise of the negative capillary pressure in the system. The negative pressure in the capillaries of concrete forces the system to contract. If the volumetric contractions are hindered by, e.g., layer bonding or rebar, and the occurred stresses are higher than the tensile strength of concrete, cracks begin to form.

3D-printed concrete elements are suspended to a much higher propensity to plastic shrinkage and related cracking than conventionally cast concrete. Cracks initiated due to plastic shrinkage can propagate through the entire cross-section of the printed wall. The damages caused by plastic shrinkage can severely affect durability, serviceability, and aesthetics and even jeopardise structural stability. Despite the importance of controlling and mitigating plastic shrinkage and later appearing shrinkage types, such as drying and autogenous shrinkage, until now, only a few studies have been dedicated to these topics.

This dissertation focuses on the mechanisms of plastic shrinkage and related cracking of 3D-printed concrete elements. Since there is no standardized or commonly recognized method for quantification of the plastic shrinkage and related cracking of the printable concretes, in this study, affordable and easy-to-apply experimental setups for measuring unrestrained and restrained shrinkage-induced deformations along with relevant material properties of 3D-printed concretes were developed. The statistical analysis verifies the reliability of the experimental results obtained with developed setups. The findings of this study contribute to establishing a unified testing framework for studying the shrinkage and related cracking of 3D-printable concretes.

On the basis of the developed experimental methodology, specifics of the mechanisms involved in the plastic shrinkage and related cracking of the 3D-printed elements were studied. The numerical simulation of the evolution of capillary pressure in 3D-printed elements supplemented experimental investigations. Special attention was paid to the analysis of the effect of the layer width and the influence of the surface area exposed to desiccation on the extent of the plastic shrinkage and cracking in 3D-printed concrete elements. It was found that the deformative behaviour due to shrinkage-induced stresses greatly differs from those of the cast concrete elements. The onset, directions and extent of the shrinkage-induced deformations in 3D-printed elements were thoroughly analysed, and as a result, analytical and numerical models for the prediction of shrinkage-induced deformations in the 3D-printed concrete elements were developed. Finally, various approaches for mitigating plastic shrinkage and cracking are analysed, and practical solutions for reducing the damages caused by shrinkage-induced deformations are suggested.