

# **Dissertation „Numerische Simulation des rheologischen Verhaltens von Frischbeton“**

**von Sergiy Shyshko**

## **KURZFASSUNG**

In dieser Doktorarbeit wird eine neue numerische Simulationsmethode zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens von Frischbeton unter Nutzung der Distinkt Element Methode (DEM) vorgestellt. Das Hauptziel der durchgeführten Untersuchungen war die Entwicklung eines numerischen Modells für Frischbeton, das eine einfache, schnelle und stabile prädiktive Simulation verschiedener betontechnologischer Vorgänge ermöglicht.

In der Literaturanalyse wird der Kenntnisstand zu numerischen Simulationen von Frischbeton vorgestellt und kritisch diskutiert, um Vor- und Nachteile anderer Methoden und Modellierungsansätze aufzudecken. Offene Fragen werden hervorgehoben und die Grundlagen zu deren Untersuchung im Rahmen dieser Doktorarbeit umfassend dargestellt. Die Grundbegriffe der Rheologie werden vorgestellt und die elementaren rheologischen Modelle von viskoelastischen Materialien betrachtet. Des Weiteren werden die rheologischen Verhalten verschieden zusammengesetzter Frischbetone vorgestellt und Einflussfaktoren auf deren Rheologie diskutiert. Ebenso werden die Basismethoden für die wissenschaftliche Untersuchung und Prüfung von Frischbeton vorgestellt. Diese werden kritisch diskutiert, um eine experimentelle Methode, die als Referenz für die numerischen Simulationen dienen soll, auswählen zu können.

Als experimentelle Referenz wurde das Setzmaß- bzw. Setzfließmaßversuch (Slump or Slump Flow Test) ausgewählt. Dieser Test wurde grundlegend studiert und dafür eine analytische Lösung entwickelt, mit der die Ergebnisse der experimentellen Messungen interpretiert und in einen Zusammenhang mit den rheologischen Konstanten des Bingham-Modells gestellt werden konnten.

In einem weiteren Schritt wurde ein umfassendes experimentelles Programm auf der makroskopischen Untersuchungsebene ausgeführt, um das rheologische Verhalten frischer Betone zu untersuchen und damit Eingangsdaten für numerische Simulationen zu generieren. Zuerst wurden Experimente auf der Makroebene durchgeführt. Hier wurde das rheologische Verhalten der frischen Betone mit Hilfe verschiedener Tests (Slump Test, Slump Flow Test, L-Box Test) untersucht. Das Setzfließmaßversuch wurde dann verwendet, um das numerische Modell für den frischen Beton zu kalibrieren. Als essentielle Kennwerte wurden Slump Flow, Slump Flow Time und die Form des „Betonkuchens“ genutzt. Damit konnten die entscheidenden Phänomene beim Fließen von frischem Beton klar dargestellt, die Kontrollpunkte für ein Kontaktmodell ausgewählt und die initialen Eingangsdaten für die Entwicklung des Kontaktmodells erhalten werden.

Anschließend wurden neuartige Experimentieranordnungen auf der Mesoebene entwickelt, erprobt und angewendet, um die Wechselwirkung zwischen zwei diskreten Partikeln in einer

flüssigen Matrix zu untersuchen. Als Matrix wurde ein transparentes Polymer auf Carbopol-Basis sowie verschiedene zementhaltige Feinststoffsuspensionen eingesetzt. Mit diesen Experimenten wurden die Materialparameter bestimmt, welche zum einen die Mikrostruktur der flüssigen Suspension und zum anderen das mikromechanische Verhalten (Kraft-Weg-Gesetz, Fließgrenze, Bindungskraft) widerspiegeln.

Auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse auf der Makro- und Mesoebene wurde das benutzerdefinierte Kontaktmodell entwickelt und in einen Partikel Flow Code implementiert. Das Kontaktmodell wurde hierbei komplett beschrieben und seine Beschränkungen diskutiert. Es wurde ein Satz von numerischen Werkzeugen entwickelt, mit dem automatisch Betone mit vorgegebener Partikelgrößenverteilung generiert sowie die Neuberechnung der Parameter des mikromechanischen Kontaktmodells bei gegebener Fließgrenze und plastischer Viskosität durchgeführt werden konnten. Mit diesen Werkzeugen wurde eine vereinfachte und stabile numerische Simulationen verschieden zusammengesetzter frischer Betone möglich.

Das Modell wurde mit Hilfe der Simulation von Setzfließmaßversuchen kalibriert und durch die entsprechende analytische Methode validiert. Mit dem kalibrierten und validierten Modell wurde der Einfluss verschiedener Modellparameter analysiert. Außerdem wurden für die Überprüfung des Modells mehrere zusätzliche Experimente simuliert. Die Ergebnisse der Modellierung wurden mit den experimentellen Ergebnissen verglichen und detailliert diskutiert. Die numerischen Simulationen lieferten qualitativ als auch quantitativ korrekte Ergebnisse und spiegelten die in realen Experimenten beobachteten Phänomene angemessen wieder.

Die Arbeit endet mit allgemeinen Schlussfolgerungen und einem Ausblick.

In der Zukunft könnten das entwickelte Kontaktmodell und die Werkzeuge des "virtuellen Betonlabors" modifiziert werden, um auch solche Eigenschaften wie das thixotrope Verhalten von Frischbeton, das Aushärten von frischem Beton oder das mechanische Verhalten erhärteten Betons abzubilden und damit das Potenzial des Labors zur Erfassung solcher Eigenschaften zu steigern.

# **Dissertation “Numerical simulation of the rheological behaviour of fresh concrete”**

**Sergiy Shyshko**

## **ABSTRACT**

This thesis reports the recent numerical investigation of the rheological behaviour of fresh concrete using the Distinct Element Method (DEM). The main goal of the investigation was development of the numerical model enabling simple, rapid and stable predictive simulation of different technological operations with fresh concrete.

Firstly, in a survey of the literature, the state-of-the-art of the numerical simulation of fresh concrete is reviewed and critically discussed with an eye toward showing the advantages and disadvantages of other methods and modelling approaches. Open questions are highlighted and the basis for their investigation is laid out in the thesis. Fundamental concepts of rheology are then presented and the basic rheological models of viscoelastic materials are considered; the rheological behaviour of different types of concretes are presented and the factors influencing it are discussed. Additionally, the chief methods of the scientific investigation and testing of fresh concrete are shown. The test methods are critically discussed in order to select the test which has been used here as a reference experimental test for the numerical simulations.

The reference experimental test chosen was the slump flow test. This test was thoroughly analysed, and an analytical solution was developed to help interpret the results of measurements and to provide a link between rheological constants and measured quantities.

In a further step an extensive experimental program was carried out in order to investigate the rheological behaviour of fresh concrete and to obtain the input data for numerical simulation. First, the experiments were performed on the macro-level. Here the rheological behaviour of the fresh concrete flow in different tests was investigated, i.e., slump and slump flow tests, and L-Box test. Further, the experiments on the meso-level with Carbopol polymer and with mortar were developed and performed in order to investigate the interaction between distinct particles suspended in a fluid matrix. The necessary material parameters, especially those representative of the fluid suspension micro structure and micromechanical behaviour, i.e., the force-displacement relationships, yield force and bond strength, were determined by these experiments. The slump flow test was used as the basic test to calibrate the model for fresh concrete. The key data were slump value, slump flow diameter for concretes with a soft consistency, and the final shape of the concrete „cake“. Hence, the crucial phenomena of fresh concrete flow were highlighted, control points for a contact model were selected, and the initial input data for the development of the contact model was obtained.

Next, a user-defined contact model was developed and implemented into the Particle Flow Code ITASCA. The contact model was completely described and its limitations discussed. Then, a set of numerical tools was developed which enables the simplified and stable numerical simulation of fresh concrete with particular behaviour, i.e., automatic generation of the concrete with given

particle grading, automatic recalculation of the micromechanical parameters of the contact model from initial yield stress, and plastic viscosity. The model was calibrated by slump flow test simulations and validated by a corresponding analytical approach. Further, the role of different model parameters was investigated by simulating the slump flow test. Furthermore, to verify the model several additional experiments were simulated, i.e., L-Box and LCPC-box test. The results of modelling were compared with experimental results and discussed in detail. All numerical simulations provide qualitatively as well as quantitatively correct results and hence adequately represent the phenomena observed in actual experiments.

The thesis closes with general conclusions and the outlook for further work. In future, the contact model and tools developed for the “Virtual concrete laboratory” could be modified in order to extend the potential of the laboratory to cover such properties as thixotropic behaviour of fresh concrete or simulating hardening of the concrete and behaviour of the hardened concrete.