

# **Entlüftungsverhalten zeitweise fließfähiger und selbstverdichtender Baustoffe**

**zur Erlangung des Doktorgrades (Dr.-Ing.)  
angenommene Dissertation**

in der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen  
der **Bergischen Universität Wuppertal**

vorgelegt von  
**Katharina Sosinka**

Wuppertal, Juni 2020

# Kurzfassung

Der erfolgreiche Einsatz eines fließfähigen Baustoffes (z.B. ZFSV, SVB) hängt maßgeblich von den Eigenschaften des frischen Materials im Einbauzustand und während der Festigkeitsentwicklung ab. Dabei ist die rheologische Fließgrenze für die Beurteilung der z.T. konkurrierenden Anforderungen hinsichtlich des Fließvermögens, der Suspensionsstabilität und der Entlüftungsfähigkeit von hoher Relevanz.

Es existieren in der Literatur zahlreiche Untersuchungen zur Beschreibung der Stabilität eines Festkörpers in einem Fluid mit Fließgrenze oder der Fließfähigkeit der Suspension. Allerdings beschränken sich diese Ansätze zumeist auf eine phänomenologische Darstellung der Materialien, widersprechen sich teilweise oder basieren lediglich auf empirischen Erkenntnissen. Ausführungen zu mechanischen Vorgängen des Entlüftungsverhaltens fehlen weitestgehend.

Sowohl für das Absinken eines Festkörpers als auch für das Aufsteigen einer Luftblase in einer hochkonzentrierten Suspension erweisen sich Umströmungsvorgänge als wesentliche Voraussetzung. Mittels numerischer Methoden und der implementierten rheologischen Modelle können Strömungsprozesse prinzipiell dargestellt werden.

In der Dissertation erfolgen zunächst experimentelle und numerische Untersuchungen zur Abbildung ebener Strömungszustände (Ausbreitverhalten von Suspensionen) mit dem Simulationsprogramm OpenFOAM®. Hier zeigt sich, dass die für das Stoffgesetz nach Bingham erforderlichen Parameter (minimale Fließgrenze, Dichte usw.) messtechnisch bestimmt werden können und mittels dieser Werte als Eingangsgrößen zufriedenstellende Simulationsergebnisse generiert werden können.

Die Durchführung von physikalischen Laborversuchen zum Aufstiegsverhalten von Luftblasen erfordert die Entwicklung einer angepassten Versuchstechnik, da es sich bei den zu untersuchenden Suspensionen um nicht transparente Medien handelt und bisherige optische Methoden nicht zielführend sind. Das neu konzipierte Mehrphasenrheometer ermöglicht unter Verwendung des Sonografieverfahrens die bildanalytische und messtechnische Auswertung des Bewegungsverhaltens von Luftblasen. Damit können Strömungsvorgänge charakterisiert und somit die Wirkung der maximalen bzw. minimalen Fließgrenze auf den Aufstiegsvorgang gezeigt werden.

Ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen werden die räumlichen Strömungsprozesse bei der Entlüftung numerisch analysiert. Für eine hinreichend genaue Darstellung des Blasenauftieges müssen im Modell nach Bingham zusätzliche Annahmen getroffen werden. Die Korrelation von Simulationsergebnissen mit den physikalischen Laborversuchen kann nur durch eine deutliche Anpassung des Parameters Fließgrenze erzeugt werden. Vor diesem Hintergrund erweist sich ein analytischer Ansatz auf der Grundlage von messbaren Materialparametern als geeignet, um diese Strömungsvorgänge nachzuvollziehen. Dies erfolgt anhand einer Analyse der Strömungssituation im Übergangsbereich von Stagnation zur Bewegung einer Luftblase.

Der in der Arbeit aufgestellte Ansatz zur rechnerischen Ermittlung des Grenzdurchmessers einer ruhenden Luftblase zeigt eine eindeutige Abhängigkeit von der maximalen Fließgrenze als Stoffparameter des umgebenden Materials. Mit den Erkenntnissen zur Umströmungssituation eines Partikels können konkrete Angaben sowie praxisrelevante Aussagen zur Verdichtungsfähigkeit eines Materials und daraus abgeleitet zur Fließfähigkeit sowie Stabilität einer hochkonzentrierten Suspension gemacht werden. Über das gewonnene Verständnis der Fließvorgänge können geeignete Baustoffeigenschaften definiert und bei Umsetzung in entsprechenden Rezepturen die zum Teil konkurrierenden Anforderungen erfüllt werden.

## Abstract

The successful deployment of any flowable type of building material (e.g. CLSM, SCC) depends largely on the characteristics of the fresh material in its installation state and during the setting process. In conjunction with this, the yield stress is of high relevancy for the assessment of the partially competing requirements with regard to the flowability, the suspension stability and the air removal capacity.

Related literature provides numerous evaluations aiming at the description of the stability of a solid sphere in yield stress fluids or the flowability of the suspension. However, these approaches, in most cases, are limited to a phenomenon-based depiction of the materials; some contradict each other or are merely based on empiric insights. There is a lack of explanations that address the mechanical processes of the air removal behavior.

For both, the sinking of a solid sphere and the rising of an air bubble to the surface in a highly concentrated suspension, flow-around streaming processes prove to be a significant prerequisite. It is principally possible to depict streaming processes with the assistance of numeric methods and the implemented rheological models.

The Dissertation begins with experimental and numeric evaluations to depict level streaming states (spreading patterns of suspensions) using the OpenFOAM<sup>®</sup> simulation program. This shows that the parameters required for the Bingham Plastic Model (minimum yield stress, density etc.) can be determined by measuring technical means and that these values can be used as entry benchmarks to generate satisfactory simulation results.

The performance of physical laboratory experiments of the rising patterns of air bubbles mandates the development of an aligned experimental technique, given that the suspensions to be examined are non-transparent media and the optical methods available to date do not meet the objectives. The new concept of a Multi-Phase-Rheometer, paired with the use of the sonography method, makes possible the imaging and measuring technology based analysis of the motion patterns of air bubbles. Consequently, it is possible to characterize streaming processes and thus the effect of the maximum or minimum yield stress on the bubble rising process.

To supplement the experiments, this Dissertation numerically analyzes the spatial streaming patterns during the air removal process. In the Bingham model, additional assumptions must be made to achieve an adequately concise depiction of the bubbles rising. The correlation of simulation results with physical laboratory testing can be produced only through a significant adjustment of the yield stress parameter. Taking this fact into account, an analytical approach based on measurable material parameters appears to be a good option to reproduce these streaming processes. This is achieved through an analysis of the streaming situation at the segue from an air bubble's stagnation to movement.

The approach taken in the Dissertation for the mathematical determination of the boundary diameter of a stagnant air bubble shows the clear dependency on the maximum yield stress as the material parameter of the surrounding material. The insights gained with regard to the streaming situation around a particle, make it possible to provide concrete details as well as make practice-relevant statements as to the compaction capabilities of a material, from which the flowability and stability parameters of a highly concentrated suspension can be deduced. The thus gained understanding of the flow processes make it possible to define suitable construction material properties and meet the partially competing mandates by implementing the former in the respective recipes.