



Berichte des Lehr- und Forschungsgebietes Geotechnik

Nr. 38

Oktober 2019

Claudia Fierenkothen genannt Kaiser

**Numerische Simulationen und
Laborversuche zur Ausbreitung von
Frischbeton in Bohrpfählen**

Numerische Simulationen und Laborversuche zur Ausbreitung von Frischbeton in Bohrpfählen

Numerical and experimental investigations concerning the spreading behaviour of fresh concrete in bored piles

von der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen
der Bergischen Universität Wuppertal
zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Claudia Fierenkothen genannt Kaiser, Mettmann

Erster Gutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort LuFG Geotechnik Bergische Universität Wuppertal
Zweiter Gutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Breitenbücher Lehrstuhl für Baustofftechnik Ruhr-Universität Bochum
Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. W. Zahlten LuFG Baumechanik und Numerische Methoden Bergische Universität Wuppertal
Weiteres Mitglied:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. A. Schlenkhoff LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau Bergische Universität Wuppertal
Tag der Einreichung:	16. Januar 2019
Tag der mündlichen Prüfung:	11. Juli 2019



Bergische Universität Wuppertal

Fakultät für Architektur und

Bauingenieurwesen

**Berichte des Lehr- und
Forschungsgebietes Geotechnik**

Nr. 38

Oktober 2019

Claudia Fierenkothen genannt Kaiser

**Numerische Simulationen und Laborversuche
zur Ausbreitung von Frischbeton in Bohrpfählen**

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6996-9

ISSN 1867-3325

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Im Rahmen der in dieser Veröffentlichungsreihe jüngst publizierten Dissertation von B. Böhle wurden nicht selten vorkommende Mängel und regelrechte Schäden bei der Herstellung von Bohrpfählen beschrieben und kategorisiert, die im Wesentlichen auf eine unzureichende Fließfähigkeit bzw. Verarbeitbarkeit des einzubauenden Frischbetons zurückzuführen sind. Die dort veröffentlichten Erkenntnisse aus Großversuchen weisen darauf hin, dass das Ausbreitverhalten des Frischbetons innerhalb von verrohrt bzw. suspensionsgestützt hergestellten Pfahlbohrungen sich durchaus abweichend von der klassischen Vorstellung einer über die gesamte Pfahlschaftfläche aufsteigenden kolbenartigen Bewegung des Frischbetons darstellt.

Frau Fierenkothen hat daher diesen Ausbreitvorgang des Frischbetons mit Hilfe der CFD-Methode strömungsmechanisch modelliert, wobei der Frischbeton als Bingham-Fluid abgebildet wird. Zur Quantifizierung der zugehörigen Stoffparameter „Fließgrenze“ und „Viskosität“ stehen bisher keine geeigneten physikalischen Laborversuche zur Verfügung, da die Korngröße der Gesteinskörnung eine direkte Bestimmung dieser Parameter z. B. im Rotationsviskosimeter unter definierten Scherspaltbedingungen nicht zulässt. Daher wurde hier der Weg gewählt, die zeitabhängige Entwicklung des Setzfließmaßes bei der Frischbetonprüfung unter Laborbedingungen zu ermitteln und in numerischen Simulationen nachzufahren. Dadurch ist eine Datenbank entstanden, mit der sich der für einen bestimmten Mischungsentwurf geeignete Parametersatz anhand der Setzfließmaß-Zeit-Kurve zutreffend angeben lässt.

Das hier beschriebene numerische Berechnungsverfahren, validiert anhand verschiedener Labor- und Großversuche, erlaubt eine Prognose des Betonausbreitverhaltens in bewehrten und unbewehrten Bohrpfählen – zunächst für Pfähle, die unter Suspensionsstützung hergestellt werden – in Abhängigkeit von der mit Bingham-Parametersätzen unterschiedlich zu beschreibenden Frischbetonqualität; dabei können auch unterschiedlich fließfähige Betonchargen kombiniert werden, so dass auch älterer, vorentwässerter Beton in seinem Einfluss auf nachfolgenden frischen Beton berücksichtigt werden kann.

Mit diesen Berechnungen gelingt es Frau Fierenkothen, die Ursachen für Boden- bzw. Suspensions-einschlüsse und mangelhafte Betonqualität vor allem in der Überdeckungszone eines eingestellten Bewehrungskorbes nachzuvollziehen.

In weiterführenden Arbeiten soll – darauf aufbauend – auch der Einfluss der Filtratwasserabgabe aus dem Beton an den umgebenden Boden – wie sie vor allem bei verrohrt hergestellten Bohrpfählen in nicht bindigen Böden auftritt – sowie die Blutwasserabgabe von Überschusswasser im Hinblick auf das Ausbreitverhalten des Frischbetons in Pfahlbohrungen und Schlitzwänden näher untersucht werden.

KURZFASSUNG

Nachträglich freigelegte Bohrpfähle zeigen nicht selten sichtbare Mängel an ihrer Pfahlintegrität. Häufig auftretende typische Schadensbilder sind dabei Betonfehlstellen mit einer teilweise oder gänzlich freiliegenden Bewehrung sowie vertikale und horizontale Furchen in der Pfahlmantelfläche.

Die Entstehung dieser Mängel ist vorrangig darauf zurückzuführen, dass der über das Kontraktorverfahren eingebrachte Frischbeton sich nicht ausreichend während des Betonierprozesses im Pfahlhohlraum verteilt hat. Die Gründe für dieses von den klassischen Erwartungen abweichende, unzureichende Ausbreitverhalten sind in den Strömungsvorgängen des Frischbetons zu suchen.

Um Rückschlüsse von den Strömungsvorgängen auf die auftretenden Mängel zu ziehen, bedarf es einer grundlegenden Untersuchung der physikalischen Fließprozesse während des Kontraktorverfahrens in Bohrpfählen. Dafür fehlte es jedoch bisher noch an einer geeigneten Untersuchungsmethode.

Ein Ziel dieser Arbeit war es daher, die Methode der numerischen Simulation, basierend auf der numerischen Strömungsmechanik (CFD), auf diesen Anwendungsfall zu übertragen, um damit die Strömungsprozesse in Bohrpfählen während der Betonage im Kontraktorverfahren detailliert untersuchen zu können.

Im Rahmen der numerischen Simulationen mit dem Code OpenFOAM wurde der Frischbeton mit einer kontinuumsmechanischen Betrachtungsweise als homogenes Fluid abgebildet, dessen Fließverhalten mit der rheologischen Modellfunktionen von Bingham beschrieben wird. Eine direkte Bestimmung der Modell-Parameter als Eingabewerte für die numerischen Berechnungen ist bisher nicht möglich. Daher erfolgte eine Kalibrierung der Parameter für unterschiedliche Frischbetone anhand physikalischer Laborversuche in einem modifizierten Versuchsstand zur Bestimmung des Setzfließmaßes und dessen numerischer Simulation.

Für den Nachweis, dass mit der gewählten numerischen Methode die Strömungsvorgänge von Frischbetonen mit einem homogenen Bingham-Ersatzfluid zutreffend simuliert werden können, wurden Validierungsversuche im Labormaßstab in einem Versuchskasten und in Modellpfählen durchgeführt. Dabei konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Laborversuche und den zugehörigen numerischen Simulationen erzielt werden.

Dass die gewählte numerische Methode auch auf praxisrelevante Fragestellungen im Maßstab der Großausführung angewendet werden kann, wurde mit einem Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulation mit physikalischen Ergebnissen, die auf großmaßstäblichen Versuchen zum Frischbetonausbreitverhalten in suspensionsgestützten Großbohrpfählen basieren, nachgewiesen. Dabei wurde in der numerischen Simulation eine zeitlich bedingte Änderung der Fließeigenschaften der Frischbetone während des gesamten Betoniervorganges berücksichtigt.

Damit steht nun eine zeit- und kostensparende Methode zur Verfügung, Strömungsvorgänge in Bauteilen des Spezialtiefbaus detailliert zu untersuchen.

Abschließend wurde eine Parameterstudie an dem numerischen Modell der Großausführung unter Variation von praxisrelevanten Randbedingungen durchgeführt und die wesentlichen Einflussparameter auf die Strömungsprozesse identifiziert.

Zusammenfassend kann mit der vorliegenden Arbeit ein von der bisherigen Vorstellung abweichendes Strömungsverhalten des Frischbetons nachgewiesen und die wesentlichen Einflussparameter identifiziert werden. Es zeigt sich, dass eine bereits eingebrachte Charge durch den einströmenden Frischbeton hauptsächlich vertikal innerhalb des Bewehrungskorbes verdrängt wird. Die Füllung der Betondeckungszone findet dagegen vorrangig durch eine horizontale Durchdringung des Bewehrungskorbes im oberen Bereich der ansteigenden Frischbetonsäule statt. Diese Horizontalströmung tritt verstärkt u. a. bei wenig fließfähigen Frischbetonen in der Betondeckungszone auf und begünstigt die Entstehung von Fehlstellen in Bohrpfählen, so dass die Bedeutung der Fließfähigkeit und Verarbeitbarkeit des Frischbetons während des gesamten Betoniervorgangs gar nicht hoch genug einzuschätzen ist, um die beschriebenen Schadensbilder in Zukunft zu vermeiden.

ABSTRACT

Cured and subsequently excavated bored piles often uncover defects in the pile structure. Commonly observed imperfections are an insufficient concrete cover and vertical and horizontal furrows in the concrete surface.

The mentioned damages are assumed to be caused by an insufficient spreading behaviour of the fresh concrete during the pouring process using a tremie pipe. To confirm the assumption that an insufficient fresh concrete flow is responsible for the mentioned damages, it is necessary to fundamentally investigate the physical flow process of fresh concrete in bored piles using a tremie pipe. However, until now there was no suitable research method.

Therefore, one important research goal of the present work was to transfer the method of numerical simulation based upon computational fluid dynamics (CFD) to this case of application in order to investigate in detail the fresh concrete flow mechanisms during the pouring process.

By means of numerical simulations using the software OpenFOAM, fresh concrete was described as a homogeneous Bingham fluid within the frame of the continuous body approach. As there are currently no reliable methods to directly determine the absolute values of the Bingham parameters, the required parameters were calibrated by means of laboratory tests with a modified experimental slump testing device and its numerical modelling in OpenFAOM.

Two different laboratory tests were conducted to verify the ability of the code to accurately simulate the flow process of homogeneous Bingham fluids in casing: a test box and reinforced piles on a laboratory scale. It could be shown that the results of the numerical simulations and the experimental tests are in satisfactory agreement with regard to the concrete flow pattern.

The capability of the code to predict the flow pattern under real-scale conditions was proved by comparing numerical results with experimental results based on investigations of fluid-supported test piles at full scale. The numerical simulation thereby considered the time-dependant increase of consistency and loss of workability of the fresh concrete throughout the pouring process.

A cost-effective and time-saving method for the investigation of fresh concrete flow in deep foundation elements is thus provided.

Finally, a parameter study was performed based on the full-scale numerical model with variation of practice-oriented boundary conditions, which identified the significant factors influencing the fresh concrete flow patterns in bored piles.

In summary, during scope of this work, it could be proved that the flow behaviour of fresh concrete in bored piles deviates from the current perception and significant influencing factors were identified. It could be shown that the fresh concrete spreads in a shell-shaped form around the tremie pipe and that incoming batches displace the previous batch in vertical direction only inside the reinforcement cage. In contrast, the concrete cover zone outside the reinforcement cage is mainly filled from the top of the rising fresh concrete column in a horizontal direction. The horizontal flow is enhanced by

a time-dependently increased consistency of fresh concrete with poor workability in the concrete cover zone and promotes the mentioned imperfections found for bored piles. Therefore the importance of the fresh concrete workability during the pouring process cannot be overstated to avoid such damages in the future.

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort des Herausgebers	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xvii
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	xix
1 Einführung und Problembeschreibung	1
2 Kenntnisstand und Forschungsansatz	3
2.1 Normative Anforderung zur Herstellung von Bohrpfählen	3
2.1.1 Kontraktorverfahren.....	3
2.1.2 Kontraktorbeton.....	4
2.1.3 Konstruktive Durchbildung.....	6
2.2 Bisherige Erkenntnisse zum Frischbetonfluss in Bohrpfählen	7
2.2.1 Erkenntnisse abgeleitet aus empirischen Untersuchungen an Pfählen	7
2.2.2 Erkenntnisse abgeleitet aus Beobachtungen der Baupraxis	11
2.3 Forschungsbedarf und Zielstellung	14
2.4 Vorgehensweise	15
3 Modellierung der Frischbetonausbreitung	17
3.1 Rheologische Eigenschaften von Frischbeton	17
3.1.1 Einführung Rheologie.....	17
3.1.2 Mathematische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Frischbeton.....	18
3.1.3 Rheologie von Kontraktorbeton	19
3.1.4 Übliche Prüfverfahren	21
3.2 Möglichkeiten zur numerischen Simulation der Frischbetonausbreitung	22

3.2.1	Numerische Methoden zur Simulation eines homogenen Fluides	23
3.2.2	Methoden der Partikelsimulation	24
3.2.3	Methoden zur Simulation einer Suspension	25
3.2.4	Auswahl des numerischen Verfahrens zur Simulation der Frischbetonausbreitung in Bohrpfählen.....	25
3.3	Numerische Strömungsmechanik.....	26
3.3.1	Einführung.....	26
3.3.2	Finite-Volumen-Methode.....	28
3.3.3	Mehrphasen-Strömungen	29
3.4	OpenFOAM.....	30
3.4.1	Allgemeines	30
3.4.2	Implementierung Nicht-Newtonscher Stoffgesetze.....	30
3.4.3	Verifikation des numerischen Codes	33
4	Kalibrierung der Fließgesetzparameter von Frischbetonen	43
4.1	Methodik	43
4.2	Laborversuche an Frischbetonen.....	44
4.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	44
4.2.2	Versuchsprogramm	46
4.2.3	Auswertung der Versuche.....	48
4.3	Numerische Simulation des Setzfließmaßversuches mit Ziehen des Prüfkonus	51
4.3.1	Einfluss der Ziehgeschwindigkeit des Prüfkonus	51
4.3.2	Numerisches Modell.....	52
4.3.3	Validierung mit einem Referenz-Fluid.....	55
4.3.4	Parameterstudie am numerischen Modell.....	58
4.4	Kalibrierung der Bingham-Parameter	62
4.5	Ergebnisdiskussion	65
5	Laborversuche zum Frischbetoneinbau	69
5.1	Allgemeines	69
5.2	Versuchskasten.....	70

5.2.1	Physikalische Modellversuche.....	70
5.2.2	Numerische Simulation.....	87
5.2.3	Gegenüberstellung: Labor und Numerik	94
5.3	Modellpfähle.....	103
5.3.1	Physikalische Modellversuche.....	103
5.3.2	Numerische Simulation.....	110
5.3.3	Gegenüberstellung: Labor und Numerik	115
5.4	Fazit.....	118
6	Nachweis der Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf die Großausführung	121
6.1	Einführung	121
6.2	Großversuche	122
6.2.1	Versuchskonzept.....	122
6.2.2	Versuchsdurchführung des suspensionsgestützt hergestellten Probepfahls mit Bewehrung.....	122
6.2.3	Ergebnisse des Großversuches	123
6.3	Numerische Berechnung.....	126
6.3.1	Numerisches Modell.....	126
6.3.2	Ermittlung der Einströmgeschwindigkeiten	127
6.3.3	Abschätzung der zeitabhängigen Setzfließmaße	129
6.3.4	Kalibrierung der zeitabhängigen Bingham-Parameter	131
6.4	Gegenüberstellung: Großversuch und Simulation	134
6.5	Ergebnisdiskussion	136
6.6	Fazit.....	137
7	Numerische Parameterstudie an der Großausführung	139
7.1	Einführung	139
7.2	Festlegung der Parameter.....	139
7.3	Numerische Modelle.....	142
7.4	Numerische Berechnungen	143
7.5	Auswertung der numerischen Simulationen.....	145

7.6	Ergebnisdiskussion	147
7.7	Fazit	153
8	Zusammenfassung und Gesamtfazit	155
9	Weiterer Forschungsbedarf	159
10	Literatur	163
	Anhang	171
A	Ergänzungen zum Kenntnisstand.....	173
B	Ergänzungen zur Kalibrierung der Fließgesetzparameter	175
C	Ergänzungen zu den Validierungsversuchen	179
	C.1 Validierungsversuche an dem Versuchskasten.....	179
	C.2 Validierungsversuche an Modellpfählen.....	187
D	Ergänzungen zum Nachweis der Übertragbarkeit auf die Großausführung	193
E	Ergänzungen zur numerischen Parameterstudie an der Großausführung	195