



Björn Böhle

**Untersuchungen im Großmaßstab zum
Fließ- und Ansteifverhalten von Beton bei
der Herstellung von Bohrpfählen**

Untersuchungen im Großmaßstab zum Fließ- und Ansteifverhalten von Beton bei der Herstellung von Bohrpfählen

von der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen
der Bergischen Universität Wuppertal

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

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Björn Böhle, Bochum

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort

Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Anders

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. A. Schlenkhoff

Weiteres Mitglied:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. A. Goldack

Tag der Einreichung:

16. Januar 2019

Tag der mündlichen Prüfung:

26. Juni 2019



Bergische Universität Wuppertal
Fakultät für Architektur und
Bauingenieurwesen

**Berichte des Lehr- und
Forschungsgebietes Geotechnik**

Nr. 37

September 2019

Björn Böhle

**Untersuchungen im Großmaßstab zum Fließ- und Ansteif-
verhalten von Beton bei der Herstellung von 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 978-3-8440-6978-5

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

Die Ausführung von Großbohrpfählen gehört zum Brot- und Buttergeschäft des Spezialtiefbaus. Bei der Freilegung von Pfählen werden allerdings des Öfteren Fehlstellen und Mängel festgestellt, die überwiegend auf eine ungenügende Verarbeitbarkeit bzw. Fließfähigkeit des eingebauten Frischbetons zurückzuführen sind.

Herr Böhle hat in der vorliegenden Arbeit aus seinen Erfahrungen in der Praxis heraus auf zwei größeren Baustellen zur diesem Thema Untersuchungen im Realmaßstab durchgeführt, die einen tieferen Einblick in die Mechanismen der Betonausbreitung in einem Bohrpfahl sowohl bei verrohrter als auch unter Suspensionsstützung hergestellter Bauweise ermöglichen. Mit den dabei gewonnenen Erkenntnissen können Rückschlüsse für eine mangelfreie Pfahlherstellung gezogen werden, die auch schon Eingang in den neuen EFFC/DFI-Guide zur Best Practice Guide to Tremie Concrete for Deep Foundations (2018) gefunden haben.

Mit der Dokumentation der Versuchsergebnisse insbesondere von den vier Probepfählen mit 1,20 m Durchmesser auf einer Baustelle in Berlin stehen nun Referenzergebnisse zur Verfügung, mit denen andere Autoren z. B. bei numerischen Simulationen der Betonausbreitung in Bohrpfählen ihre Berechnungen validieren können. Es steht zu hoffen, dass durch die hier formulierten Erkenntnisse und Hinweise die Kontrolle des einzubauenden Betons, insbesondere seiner Fließeigenschaften, verbessert wird, um das Auftreten von Fehlstellen und Mängeln in Zukunft zu minimieren.

Matthias Pulsfort

September 2019

KURZFASSUNG

Im Spezialtiefbau werden Bohrpfähle in der Regel verrohrt oder suspensionsgestützt hergestellt. Die Auswahl erfolgt meistens in Abhängigkeit des Bodens, der Projektgröße und der Tiefe. Übliche Pfahldurchmesser liegen zwischen 0,90 m und 1,80 m. Die Einbau- und Erstarrungsbedingungen für Betone im Spezialtiefbau unterscheiden sich grundlegend von Stahlbeton-Anwendungen im Ingenieur- und Hochbau. Insbesondere beim Einbau des Betons in verrohrte Bohrungen kann der Frischbeton sehr viel Überschusswasser an das umgebende Porensystem des Bodens abgeben und so seine Fließfähigkeit verlieren. Betone für Anwendungen im Spezialtiefbau haben i.d.R. deutlich höhere w/z-Werte als für die Hydratation erforderlich und neigen daher zur Abgabe von Überschusswasser, besonders wenn sie in die meist sehr schlanken Bauteile und in große Tiefen eingebaut werden und dort relativ hohen hydrostatischem Druck ausgesetzt sind. Um Einschlüsse von Fremdmaterial und/oder Segregation zu vermeiden, dürfen die Betone nicht durch Rütteln verdichtet werden, sondern müssen selbstverdichtend sein. Ihr Einbau erfolgt im Kontraktorverfahren durch ein dichtes Schüttrohr. Dabei fließt der Beton zunächst vertikal durch das Schüttrohr, tritt dann in großer Tiefe aus dem Schüttrohr aus und ist den dort herrschenden Druckverhältnissen innerhalb des Bohrlochs ausgesetzt. Von dort steigt der Beton aufwärts, wird beim Nachfüllen von Frischbeton, beim Ziehen des Schüttrohres und Ziehvorgängen des Bohrrohres immer wieder bewegt und muss in der Lage sein, durch Nachfließen den freiwerdenden Ringspalt des Bohrrohrüberschnitts zum Baugrund zu füllen.

Trotz Verwendung eignungsgeprüfter und bewährter Betonrezepturen für den Spezialtiefbau kommt es bei der Herstellung von Bohrpfählen mitunter Mängeln und Schäden. So können sich Bewehrungskörbe im Bohrrohr verklemmen und werden mitgezogen, die Betonsäule kann abreißen, oder es kann durch unzureichendes Nachfließen des Frischbetons zu Bodeneinschlüssen im Bereich der Schaftwandung oder im Inneren des Pfahles kommen. Die Überwachung der Frischbetoneigenschaften nach Anlieferung auf die Baustelle erfolgt bisher den Normen entsprechend mit Versuchen, die eigentlich für Beton im Ingenieur- und Hochbau konzipiert wurden. Gegenwärtig sind nur Empfehlungen aus Österreich, Australien und dem europäischen sowie amerikanischem Verband der Spezialtiefbauunternehmen (EFFC/ DFI) veröffentlicht, die besondere Prüfmethode für Spezialtiefbaubetone behandeln.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf mehreren Pfahl-Baustellen erweiterte Frischbetonversuche zur Untersuchung des Ansteifverhaltens des Betons und Großversuche an Bohrpfählen im Originalmaßstab mit unterschiedlich gefärbten Betonchargen zur Bestimmung des Betonausbreitverhaltens durchgeführt. Die mit Farbbeton hergestellten Probepfähle wurden im Zuge der Aushubarbeiten mit Kernbohrungen untersucht bzw. komplett geborgen und aufgeschnitten. Aus den Untersuchungen ist zu erkennen, dass sich der Beton schalenförmig von innen nach außen verteilt. Beim weiteren Betoneinbau bilden sich nach innen weitere Schalen. Der Betonfluss erfolgt beim Einbau überwiegend in einer „torpedoartigen“ Zone um das Schüttrohr herum, während man nach der klassischen Vorstellung ein Aufsteigen des Betons über den gesamten Pfahlquerschnitt erwarten würde.

ABSTRACT

In special geotechnical works bored piles are usually installed by means of cased or slurry supported drillings. The choice of method depends on soil conditions, project size and depth. Common borehole diameters used are within a range between 0.90 m and 1.80 m. The installation and setting conditions for ground engineering concrete differ significantly from applications in civil and structural engineering. Especially in the context of concrete pouring in cased drillings the fresh concrete can provide large quantities of excess water to the surrounding pore system of the soil and thus lose its flow capability, when the casing is pulled up. In ground engineering, concrete mixes for applications like these have significantly higher water/ cement ratios than required for hydration, thus they tend to discharge excess water, especially when they are mainly installed in slim boreholes and in large depth where they are exposed to relatively high hydrostatic pressure. To avoid inclusions of external material and/ or segregation, it is not allowed to compact the concrete by means of vibration, instead the fresh concrete shall be self-compacting. The installation is to be done using the tremie method through a dense tremie pipe. First of all the concrete flows down vertically within the tremie pipe, it flows out of the pipe mouth at large depth and is exposed to the prevailing high pressure conditions within the borehole. From there the concrete rises upwards, whereby it is continuously moved through the flow of the fresh concrete by the pull-out movement of the tremie pipe and the casing and finally the concrete needs to be able to fill the ring gap between the inner diameter of the casing shoe and the surrounding the subsoil.

Despite the use of suitability-tested and proven concrete mixtures for ground engineering, at times there are defects and imperfections during the production of bored piles. Subsequently the reinforcement cages can get stuck in the casing and be pulled out, the concrete filling may tear off or there can be soil inclusions in the shaft or inside the pile due to insufficient flow capability. The supervision of fresh concrete properties after delivery to the construction site is done according to standards with tests originally designed for civil and structural engineering. Currently, only recommendations from Austria, Australia and joint European and US federations of ground engineering contractors (EFFC/ DFI) include alternative test methods specially designated to concrete in ground engineering.

In front of this background, extended fresh concrete tests were executed on different pile sites in order to analyze the stiffening and flow behavior of the fresh concrete in large-scale tests with differently colored concrete batches to visualize the flow patterns. Test piles with colored concrete were analyzed with core drillings during excavation works of a pit or completely exposed. The results clearly show a shell-shaped concrete flow pattern. Further concrete installation leads to additional shells from the inside, displacing and compressing the former shells at the outside. Concrete flow during installation predominantly develops in some kind of “torpedo-type” zone around the tremie pipe, while according to the classic understanding a rising of concrete over the whole cross-section would have been expected.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIV
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	XV
1. Einleitung	1
2. Bauverfahren	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Bohrpfähle für Tiefgründungen	6
2.2.1 Verrohrte Bohrfahlherstellung	6
2.2.2 Suspensionsgestützte Bohrfahlherstellung	10
2.3 Stützwände für Baugrubensicherungen aus Bohrpfählen	13
2.4 Imperfektionen, Schäden und Mängel	14
3. Normative Anforderungen an Betone für den Spezialtiefbau	27
3.1 Allgemein	27
3.2 Ausführungsnorm DIN EN 1536	28
3.3 Merkblatt „Weiche Betone“	31
3.4 Richtlinie Bohrpfähle	33
3.5 Recommended Practice – Tremie Concrete for Deep Foundations	34
3.6 EFFC/ DFI - Guide to Tremie Concrete for Deep Foundations	38
4. Untersuchungen anderer Autoren	43
5. Erweiterte Frischbetonversuche	55
5.1 Allgemein	55
5.2 Betonrezepturen	55
5.3 Blutneigung	58
5.4 Filterpressversuche	61
5.5 Wassergehalt	67
5.6 Scherfestigkeit	68
5.7 Zusammenfassung der Frischbetonversuchsergebnisse	70

6. Untersuchungen an einer realen Bohrfahlwand.....	73
6.1 Untersuchungskonzept	73
6.2 Projektbeschreibung	73
6.3 Bohrfahlarbeiten.....	74
6.4 Farbbeton	75
6.5 Kernbohrarbeiten.....	78
6.6 Ergebnisse und Auswertungen.....	81
7. Großversuche an Gründungspfählen	93
7.1 Versuchskonzept	93
7.2 Projektbeschreibung.....	93
7.3 Bohrfahlarbeiten.....	94
7.4 Farbbeton	95
7.5 Auswertungen und Dokumentation.....	96
7.6 Farbbetonverlauf Probepfahl P 1 (suspensionsgestützt)	99
7.7 Farbbetonverlauf Probepfahl P 2 (suspensionsgestützt)	102
7.8 Farbbetonverlauf Probepfahl P 3 (verrohrt).....	105
7.9 Farbbetonverlauf Probepfahl P 4 (verrohrt).....	107
7.10 Ergebnisse	109
7.10.1 Suspensionsgestützte Bohrfahlherstellung.....	109
7.10.2 Verrohrte Bohrfahlherstellung	111
8. Modell zur Nachbildung des Betonausbreitverhaltens in der Bohrfahlwand ...	115
8.1 Konzept	115
8.2 Ergebnis Bohrfahl 2	116
8.3 Ergebnis Bohrfahl 9	120
8.4 Bewertung der Nachbildung	125
9. Schlussfolgerungen für den Beton.....	127
10. Zusammenfassung und Ausblick.....	129
Literaturverzeichnis.....	131
Anhang	135