

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Author's Postprint

## **Fierenkothen, Claudia; Gebrien, Finja; Pulsfort, Matthias; Herten, Markus Einfluss von strömendem Grundwasser auf die Frischbeton-Integrität von Ortbetonpfählen**

Report Geotechnik Universität Duisburg-Essen

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108898>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Fierenkothen, Claudia; Gebrien, Finja; Pulsfort, Matthias; Herten, Markus (2021): Einfluss von strömendem Grundwasser auf die Frischbeton-Integrität von Ortbetonpfählen. In: Perrau, Eugen (Hg.): Geotechnik und Wasser – Planung, Berechnung und Ausführung : Tagungsband zum 11. RuhrGeo-Tag am 26.03.2020 in Essen. Report Geotechnik Universität Duisburg-Essen 2020. Düren: Shaker Verlag. S. 119-139.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



**Erstveröffentlichung in Perrau, Eugen (Hg.) (2020): Geotechnik und Wasser – Planung, Berechnung und Ausführung: Tagungsband zum 11. RuhrGeo-Tag am 26.03.2020 in Essen. Report Geotechnik Universität Duisburg-Essen, Bd. 44. Düren: Shaker, S. 119-139.**

# **Einfluss von strömendem Grundwasser auf die Frischbeton-Integrität von Ortbetonpfählen**

C. Fierenkothen<sup>a</sup>, F. Grebien<sup>a</sup>, M. Pulsfort<sup>a</sup>, M. Herten<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Bergische Universität Wuppertal, Lehrstuhl für Geotechnik

<sup>b</sup> Bundesanstalt für Wasserbau, Referat Grundbau, Abteilung Geotechnik

## **1 Problembeschreibung**

Ortbetonbohrpfähle werden im geotechnischen Bereich vielseitig eingesetzt, beispielsweise als Tiefgründung, als wandartige Stützkonstruktion oder zur Umschließung und Abdichtung von Baugruben oder Bauwerken. Durch die oft großen Einbindetiefen in den Baugrund werden Ortbetonpfähle in der Regel unterhalb des Grundwasserspiegels hergestellt.

Die Herstellung dieser Pfähle erfolgt dabei mit dem sogenannten Kontraktorverfahren. Die Stützung des Bohrlochs wird dabei durch eine temporäre Außenverrohrung oder bei unverrohrter Ausführung mit einer Stützflüssigkeit (Bentonitsuspension oder Polymerlösung) gewährleistet.

Im Rahmen dieser Untersuchung wird besonderes Augenmerk auf die Herstellung von Ortbetonbohrpfählen in Bodenschichten mit starker Grundwasserströmung gelegt, durch die es zu einer starken Umströmung der Pfähle kommen kann. Nach Ziehen der Außenverrohrung ist aufgrund einer solchen Grundwasserumströmung an der Mantelfläche eines frisch betonierten Pfahls eine Erosion und damit eine Umlagerung oder Abtragung von Zementleim nicht auszuschließen. Die Folgen könnten Querschnittseinschnürungen mit einer reduzierten Betonüberdeckung sowie eine reduzierte Mantelreibungsübertragung auf den Pfahlschaft sein, sodass sowohl die (innere und äußere) Tragfähigkeit als auch die Dauerhaftigkeit der Ortbetonpfähle beeinträchtigt werden können.

## **2 Kenntnisstand und Forschungsansatz**

### **2.1 Stand der Normung**

In der geotechnischen Fachliteratur, der deutschen Normung oder internationalen Richtlinien wird nur peripher auf die Herstellung von Ortbetonpfählen in strömendem Grundwasser und das Risiko von möglichen strömungsinduzierten Einbußen der Frischbeton-Integrität an der Pfahlmantelfläche eingegangen. Nach DIN EN 1536 wird empfohlen, Vorkehrungen dahin zu treffen, dass keine Feinteile des Betons aus der Pfahlmantelfläche durch strömendes Grundwasser ausgewaschen werden. Ein

zuverlässiger Schutz vor solchen strömungsinduzierten Auswaschungen kann bei der Herstellung von Bohrpfählen durch eine bleibende Verrohrung oder Hülse erreicht werden.

Im internationalen Raum wie z. B. in der finnischen Richtlinie „Instructions for drilled Piling - Design and Execution Guide“ (FINNRA 2010), ebenso wie in dem englischen Leitfaden „Piling and Penetrative Ground Improvement Methods on Land Affected by Contamination: Guidance on Pollution Prevention“ (Westcott et al. 2001) wird ebenfalls auf eine permanente Verrohrung zum Schutz vor Grundwasserströmung hingewiesen. Nach der amerikanischen FHWA-Richtlinie „Drilled Shafts: Construction Procedures and LRFD Design Methods“ (Brown et al. 2010) wird empfohlen, falls der Einbau einer dauerhaften Verrohrung nicht möglich ist, einen schnell abbindenden Beton zu verwenden, um mögliche Ausspülungen zu minimieren.

In den Empfehlungen des Arbeitsausschusses Pfähle (EA-Pfähle) wird bezüglich starker Grundwasserströmung bei der Pfahlherstellung im Zusammenhang mit der Qualitätssicherung bei der Bauausführung lediglich auf die entsprechenden Herstellungsnormen verwiesen (Kempfert 2013).

In der Herstellungsnorm für Mikropfähle (DIN EN 14199) aus Verpressmörtel, Zementmörtel/Feinkornbeton oder Beton wird ebenfalls eine bleibende Verrohrung zum Schutz vor stark strömendem Grundwasser genannt sowie auf andere Schutzmaßnahmen hingewiesen. Auch nach DIN EN 12699 wird zur Ausführung von Ortbeton-Verdrängungspfählen eine bleibende Verrohrung oder Hülse zum Schutz vor Ausspülungen am Frischbeton genannt; dabei empfiehlt diese Norm eine bleibende Verrohrung zur Verhinderung von Einschnürungen (Querschnittsverminderungen) oder unkontrollierten Schaftaufweitungen.

## **2.2 Stand der Forschung**

In einem Forschungsprojekt am Institut für Bauforschung Aachen wurde das Auslagverhalten von Frischbeton bei stehendem sowie bei strömendem Wasser untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass schon geringe Wasserströmungen in porösen Medien die Kraft besitzen, Stoffe aus dem Frischbeton zu lösen (Brameshuber & Vollpracht 2009).

Mögliche Auswirkungen von strömendem Grundwasser auf Form und Größe von Düsenstrahlsäulen wurden bereits früher an der Bergischen Universität Wuppertal in physikalischen Laborversuchen untersucht. Die Ergebnisse dieser Versuche zeigten, dass in sehr durchlässigen Böden erste Erosionserscheinungen bei Düsenstrahlsäulen aus reiner Zementsuspension bereits bei mäßigen Strömungsgeschwindigkeiten ( $v_f = 20 - 30 \text{ m/d}$ ) auftreten. Bei einer weiteren Erhöhung der Filtergeschwindigkeit des strömenden Wassers konnten starke Veränderungen der Konturen und somit eine Umlagerung des Säulenmaterials beobachtet werden (Drzewiecki 2012).

## **2.3 Forschungsbedarf**

Auf Grundlage der aktuellen Normung und des bisherigen Standes der Forschung bleibt jedoch die Frage offen, ab welcher Strömungsgeschwindigkeit eine bleibende Verrohrung oder Hülse bei der Herstellung von Ortbetonpfählen erforderlich sein kann. Nach Sichtung der Literatur ist bisher keine

„zulässige“ Grundwasserfließgeschwindigkeit bekannt, bei der qualitätsmindernde Ausspülungen am Frischbetonpfahl sicher ausgeschlossen werden können.

## **2.4 Vorgehensweise**

Im geotechnischen Labor der Bergischen Universität Wuppertal wurde im Rahmen einer Masterarbeit (Ritte 2018) ein Versuchsstand entwickelt, in dem Modellpfähle aus Ortbeton und Zementsuspension in einem Versuchsboden hergestellt und anschließend mit Wasser umströmt werden können. Für eine systematische Untersuchung der beschriebenen Fragestellung wurden folgende Parameter bei der Durchführung der Laborversuche variiert: Filtergeschwindigkeit des strömenden Wassers, Durchlässigkeit des durchströmten Versuchsbodens, Art der Bohrlochstützung und das Pfahlmaterial.

Zusätzlich wurden zur Übertragung der Erkenntnisse aus den Laborversuchen im Modellmaßstab auf den Maßstab der Großausführung numerische Simulationen nach der CFD-Methode (Computational Fluid Dynamics) durchgeführt. Dafür wurde die frei verfügbare Software OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation) eingesetzt.

Mit Hilfe der physikalischen Modellversuche und der hydraulischen Simulationen kann die Zementleimausspülung infolge unterschiedlicher Filtergeschwindigkeiten des strömenden Wassers dargestellt und beurteilt werden. Daraus soll ein schadensfrei „zulässiger“ Grenzwert für die Filtergeschwindigkeit von Grundwasser während der Herstellung von Ortbetonpfählen abgeleitet werden.

## **3 Physikalische Modellversuche zur Zementleimausspülung bei Pfählen infolge einer Grundwasserumströmung**

### **3.1 Modellpfähle aus Ortbeton**

#### **3.1.1 Konzept des Versuchsstandes**

Der Versuchsstand wurde mit einer Höhe und Breite von ca. 1,0 m und einer Länge von 1,9 m konstruiert (Abb. 3.1). Für jeden Versuchsdurchgang wurde der Versuchsboden in den Kistenhohlraum lagenweise eingebaut und unter Wasser verdichtet. Für die (lagenweise) Verdichtung des Bodens wurde über vier Außenrüttler Vibrationsenergie auf den kompletten Versuchsstand aufgebracht. Damit der Versuchsstand frei schwingen konnte, wurde dieser mit möglichst geringem Gewicht hergestellt und auf Elastomerlager gesetzt. Über regelmäßige Dichtebestimmungen an dem eingebauten Versuchsboden wurde die angestrebte Lagerungsdichte des Bodens nachgewiesen.

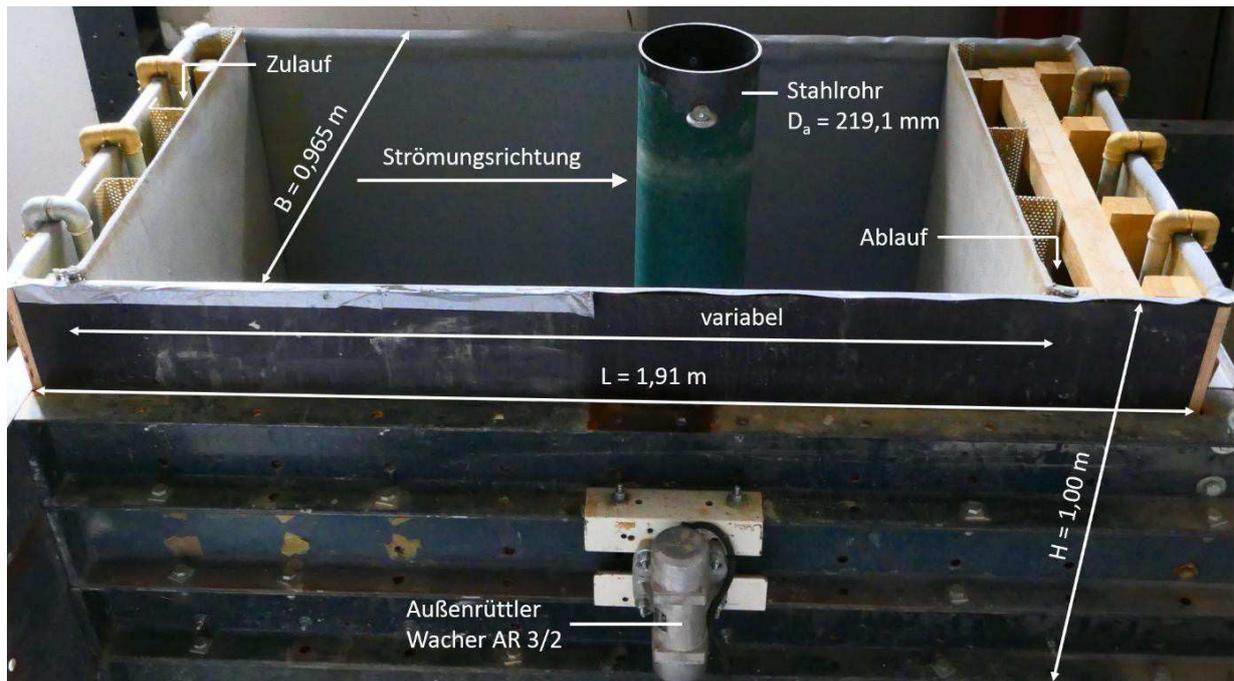


Abbildung 3.1: Konstruktion des leeren Versuchsstandes mit eingestellter Außenverrohrung -des herzustellenden Modellpfahls

Um das hydraulische Gefälle bzw. die Filtergeschwindigkeit in dem Bodenkörper variieren zu können, wurden über einen Pumpenkreislauf im Zu- und Ablaufbereich verschiedene Wasserspiegelhöhen eingestellt. Durch Versetzen der Trennwand im Ablaufbereich konnte die Länge des durchströmten Bodens und damit das hydraulische Gefälle zusätzlich variiert werden. Die Trennwände wurden dabei aus Lochblechen hergestellt, sodass sowohl ein ungehinderter Durchfluss als auch eine seitliche Stützung des Bodenkörpers gewährleistet werden konnte. Zur kontinuierlichen Messung des Wasserdrucks wurden im Zu- und Ablaufbereich Druckmessdosen installiert.

Für die Herstellung der verrohrt gestützten Modellpfähle wurde ein Stahlrohr als Außenverrohrung ( $D_a = 219,1 \text{ mm}$ ) verwendet, mit dem ein geometrischer Modellmaßstab von 1:5 abgebildet werden kann. Aus versuchstechnischen Gründen wurde, abweichend von der Realausführung, im Vorfeld die Außenverrohrung des Modellpfahls in dem Versuchsstand positioniert. Damit der Frischbeton nicht schon unter Wasser eingebracht werden musste, wurde während des Bodeneinbaus und des Einstellens des hydraulischen Gefälles die Außenverrohrung dafür am Fuß auf eine verlorene Dichtung angepresst.

### 3.1.2 Festlegung der Versuchsparameter

Bei den Laborversuchen wurden bisher die nachfolgenden Parameter variiert, um mögliche praxisrelevante Einflussfaktoren auf eine strömungsinduzierte Auswaschung des Zementleims identifizieren zu können:

#### a) Einbauverfahren

Die Versuchsreihe erfolgte mit Modellpfählen, die - wie in der Praxis meistens üblich - im Schutze einer Verrohrung hergestellt werden. Dabei greifen die Strömungskräfte direkt nach dem Ziehen der Verrohrung an der Modellpfahloberfläche an. Zusätzlich wurden zwei unverrohrt hergestellte Pfähle mit Suspensionsstützung untersucht.

#### b) Mischungsentwurf des Betons

Für den verwendeten Beton der Modellpfähle wurde der Mischungsentwurf variiert. Der erste Mischungsentwurf beinhaltet, angepasst an den Maßstab der Modellpfähle, eine Sieblinie mit einem Größtkorn 8 mm (GK8). Zum Vergleich wurden zusätzlich Modellpfähle aus einem üblichen Bohrpfahlbeton mit einem Größtkorn von 16 mm (GK16) hergestellt.

#### c) Bodenparameter

Für die Untersuchung eines „zulässigen“ Grenzwertes für die Filtergeschwindigkeit wurde der Versuchsboden so gewählt, dass Geschwindigkeiten erzielt werden konnten, die deutlich über den praxisrelevanten Grundwassergeschwindigkeiten liegen.

Dazu muss der durchströmte bzw. den Pfahl umgebende Boden eine hohe Durchlässigkeit aufweisen. Daher wurden im Sinne von DIN 18130 ein „stark“ durchlässiger Boden ( $k_1 = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ ) und ein „sehr stark“ durchlässiger Boden ( $k_2 = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ ) für die Versuchsreihe verwendet.

#### d) Pumpenleistung

Durch eine Variation der Pumpenleistung und der Einbaulänge des durchströmten Bodenkörpers wurden verschiedene hydraulische Gefälle eingestellt, sodass sich unterschiedliche Filtergeschwindigkeiten ausbilden konnten.

### 3.1.3 Versuchsmatrix

Aus den zuvor beschriebenen festgelegten Versuchsparametern ergab sich für die Durchführung der physikalischen Modellversuche die Versuchsmatrix nach Tab. 3.1:

Tabelle 3.1: Versuchsmatrix der physikalischen Modellversuche und deren Bezeichnung

Durchlässigkeit des Bodens	Pfahlmaterial	Art der Stützung	Filtergeschwindigkeit $v_f$ [m/d]				
$k_1$	GK8	FS		v120			
		VS	v15	v115	v150		
	GK16			v145			
$k_2$	GK8	FS				v380	
		VS	v65			v350	v700
	GK16					v670	

Erläuterung der Abkürzungen:

$k_1, k_2$ : Durchlässigkeit  $k$  des Versuchsbodens; GK8, GK16: Sieblinie mit einem Größtkorn von 8 mm/ 16 mm; FS: flüssigkeitsgestützt; VS: verrohrt gestützt; v: Angabe der Größenordnung der Filtergeschwindigkeit  $v_f$  [m/d]

### 3.1.4 Versuchsdurchführung

Nach Einbau des Versuchsbodens um die Außenverrohrung wurde über die Pumpen ein Kreislauf eingestellt, sodass eine weitgehend stationäre Strömung im Bodenkörper erzeugt wurde. Während der gesamten Versuchsdauer wurden über Druckaufnehmer kontinuierlich die Wasserstände im Zu- und Ablaufbereich aufgezeichnet. Mit Hilfe von Pegelmessstellen wurden zusätzlich die Pegelstände neben dem Pfahl vor Versuchsbeginn und am Ende der Versuchszeit gemessen. Durch den gemessenen Volumenstrom im Pumpenkreislauf und die Messung der Potentialhöhen im Zu- und Ablaufbereich kann das hydraulische Gefälle und die effektive Filtergeschwindigkeit ermittelt werden.

Bei den suspensionsgestützt hergestellten Modellpfählen wurde nach Erzeugung der Strömung die Bentonitsuspension in die Außenverrohrung eingebracht. Die Verrohrung wurde dann um 80 cm gezogen, sodass noch ca. 20 cm im Boden als „Leitrohr“ eingebunden blieben. Anschließend erfolgte die Betonage des Modellpfahles mit dem Kontraktorverfahren.

Bei den verrohrten Ortbeton-Modellpfählen wurde nach Erzeugung des hydraulischen Gefälles im umgebenden Bodenkörper der Frischbeton über ein Schüttrohr in die Außenverrohrung bis zur Oberkante des Bodens einbracht und anschließend die Verrohrung gezogen.

Die Dauer der Umströmung der Modellpfähle wurde auf ca. 4 h begrenzt. Während der Versuchsdauer erfolgte zusätzlich eine kontinuierliche Messung des pH-Wertes des Wassers im Ablaufbereich der Modellpfähle.

### 3.1.5 Versuchsauswertung

Die Auswertung der Laborversuche erfolgte im Hinblick auf die Identifizierung von möglichen Auspülungen von Zementleim aus dem Frischbeton über eine Bewertung der endgültigen Kontur der erhärteten Betonpfähle sowie über die gemessenen pH-Werte des Wassers im Ablaufbereich der Modellpfähle. Nachdem der Modellpfahl vollständig abgebunden war, wurde dieser zu Auswertungszwecken freigelegt, vermessen und hinsichtlich seiner Oberflächenbeschaffenheit bewertet.

### 3.1.6 Versuchsergebnisse an Ortbeton-Modellpfählen

Die verrohrt hergestellten Ortbeton-Modellpfähle zeigten nach Freilegen keine signifikanten Auffälligkeiten in ihrer Kontur. In Abb. 3.2 sind exemplarisch zwei Modellpfähle dargestellt.

Unmittelbar während des Ziehens der Verrohrung entsteht ein Ringspalt zwischen dem anstehenden Boden und der Frischbetonsäule. Aufgrund des hydrostatischen Drucks und seiner Fließfähigkeit besitzt der Frischbeton das Potential, diesen Ringspalt vollkommen zu schließen, sodass als Referenzdurchmesser der Außendurchmesser des Stahlrohres mit  $D_a = 219,1$  mm herangezogen werden kann.

Zusätzlich filtrierte der Frischbeton durch den hydrostatischen Überdruck im Pfahlhohlraum Zementleim an das Porensystem des Bodens ab, sodass ein Filterkuchen mit geringerem Wassergehalt entsteht. Der infiltrierte Zementleim verursacht eine Anhaftung von Gesteinskörnern an der ursprünglichen Pfahlmantelfläche. Daher weist die Oberfläche des abgebundenen und freigelegten Modellpfahls eine feste Oberfläche mit anhaftenden Bodenkörnern auf und der Pfahldurchmesser ergibt sich zu  $> 219,1$  mm.

a)



b)



Abbildung 3.2: Verrohrt hergestellte Modellpfähle mit GK8:

a) k1-GK8-VS-v115 (Boden1), b) k2-GK8-VS-v700 (Boden2)

Abb. 3.3 zeigt hingegen exemplarisch einen suspensionsgestützt hergestellten Modellpfahl. Wie bereits erwähnt, verblieb am Pfahlkopf ein „Leitrohr“, so dass dort der Pfahl in Schalung erhärten konnte. An dem freigelegten Modellpfahl ist der Übergang von dem suspensionsgestützten Bereich

zu dem verroht gestützten Bereich deutlich sichtbar. Im flüssigkeitsgestützten Bereich bildete sich deutlich ein Filterkuchen ( $d \approx 5$  cm) infolge Eindringung der Bentonitsuspension in den umgebenden Boden aus. Nachdem dieser Bentonit-Filterkuchen vollständig entfernt war, zeigte sich eine eben glatte Betonoberfläche an dem Modellpfahl (Abb. 3.3 c).

Visuell sind an den Ortbeton-Modellpfählen keine Unterschiede in der Pfahlkontur im Hinblick auf eine strömungsinduzierte Umlagerung von Zementleim erkennbar. Für eine differenzierte Beurteilung wurden zusätzlich an den Modellpfählen die Durchmesser in und quer zur Strömungsrichtung in den Höhen 20 cm und 80 cm ab Pfahlsohle bestimmt. Exemplarisch sind in Abb. 3.4 a) und b) die ermittelten Pfahldurchmesser in und quer zur Strömungsrichtung für den Boden 2 ( $k_2$ ) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen die Tendenz, dass die Durchmesser der mit Verrohrung hergestellten Modellpfähle sowohl in als auch quer zur Strömungsrichtung mit zunehmender Filtergeschwindigkeit leicht abnehmen. Zusätzlich zeigt sich, dass die Durchmesser quer zur Strömungsrichtung tendenziell geringer sind als jene in Strömungsrichtung.

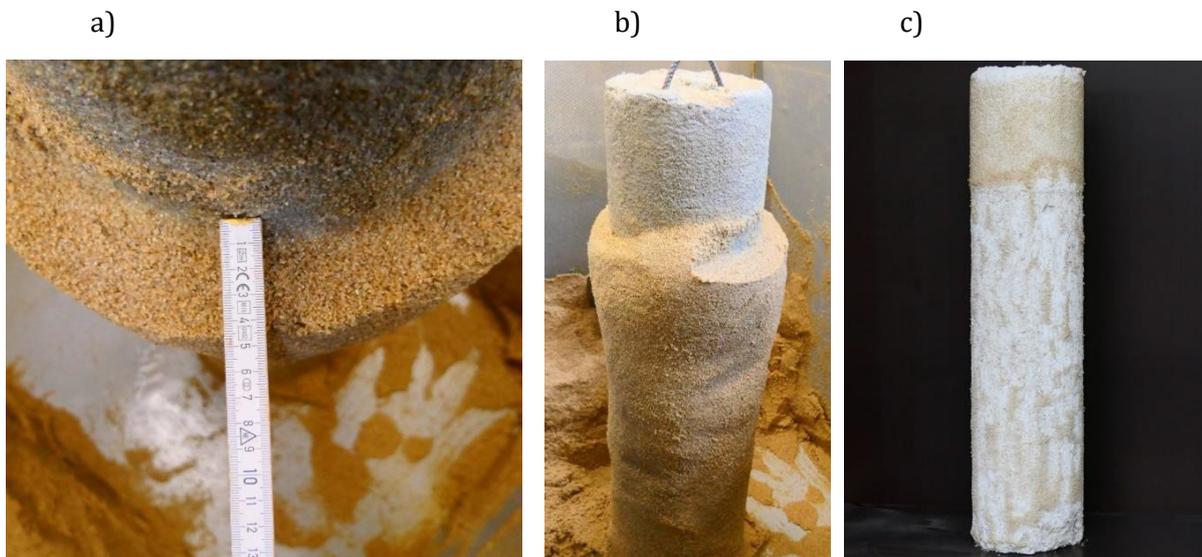


Abbildung 3.3: suspensionsgestützt hergestellter Modellpfahl mit GK8 (k1-GK8-FS-v120):  
a) Detail Filterkuchen, b) freigelegter Modellpfahl mit Filterkuchen,  
c) Modellpfahl nach Abtrag des Filterkuchens

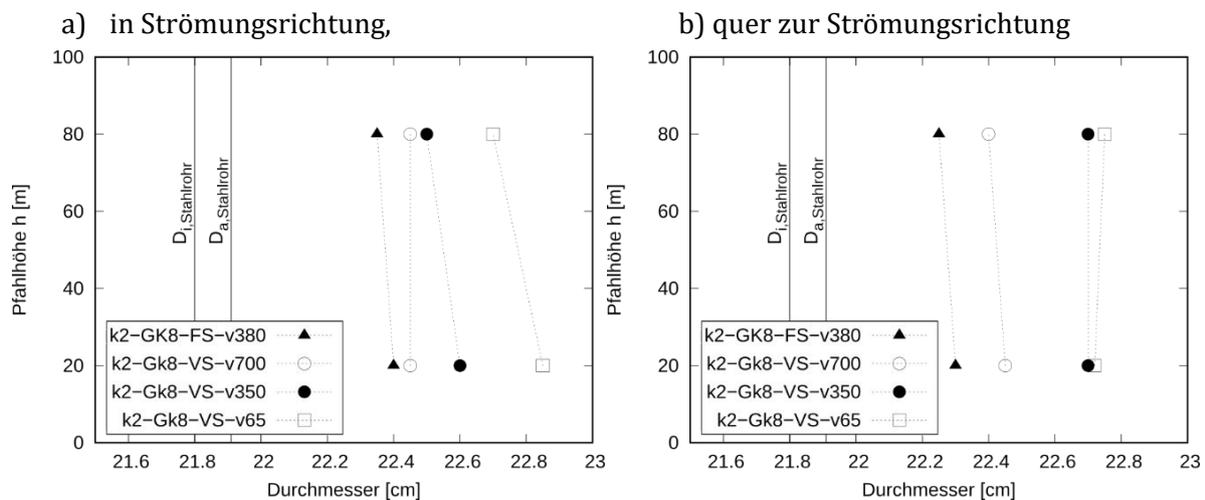


Abbildung 3.4: Durchmesser der Modellpfähle mit GK8:  
a) in Strömungsrichtung, b) quer zur Strömungsrichtung

Der suspensionsgestützt hergestellte Modellpfahl weist im Vergleich die geringsten Durchmesser auf. Bei den verrohrt hergestellten Pfählen haftet die Gesteinskörnung an der Pfahlmantelfläche stärker an, während im Gegensatz dazu bei dem suspensionsgestützten Pfahl nach Entfernen des Bentonit-Filterkuchens eine Betonpfahloberfläche ohne anhaftende Körnung zum Vorschein kommt. Dies lässt sich damit erklären, dass durch die Ausbildung des Bentonit-Filterkuchens eine Eindringung von Zementleim aus dem Frischbeton in den anstehenden Boden verhindert wird.

## 3.2 Modellpfähle aus Zementsuspension

### 3.2.1 Vorgehensweise

In einer früheren Untersuchung an Düsenstrahlsäulen konnte gezeigt werden, dass die Form und Größe der hergestellten Säulen durch strömendes Grundwasser beeinflusst werden können. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung zusätzlich zu den Pfählen mit Beton/Gesteinskörnung auch Pfähle aus reiner Zementsuspension hergestellt und diese auf ihren Erosionswiderstand hin betrachtet.

Die Versuche wurden in dem zuvor beschriebenen Versuchsstand (vgl. Kap. 3.1.1) unter Verwendung beider Versuchsböden ( $k_1$  und  $k_2$ ) durchgeführt. Über den Pumpenvolumenstrom und dem hydraulischen Gefälle kann rückwirkend abgeleitet werden, dass der Modellpfahl in Boden 1 ( $k_1$ -Z-VS-v100) mit einer Filtergeschwindigkeit von  $v = 100$  m/d und der Modellpfahl in Boden 2 ( $k_2$ -Z-VS-v290) mit einer Filtergeschwindigkeit von  $v = 290$  m/d umströmt wurde.

Die Versuchsdurchführung erfolgte mit einer verrohrten Stützung des Bohrloches analog zu der Herstellung der Ortbetonpfähle, die in Kap. 3.1.3 beschrieben ist. Zu Auswertungszwecken wurden die Modellpfähle nach vollständigen Erhärten freigelegt.

### 3.2.2 Versuchsergebnisse an den Modellpfählen aus Zementsuspension

Die Pfahlkonturen der freigelegten Zementsuspensionspfähle (Abb. 3.5) zeigen deutliche Ausspülungen von Zementleim. Der Modellpfahl k1-Z-VS-v100 (Filtergeschwindigkeit  $v = 100$  m/d) zeigt im direkten Vergleich geringere Erosionserscheinungen in Strömungsrichtung (Abb. 3.5a). Bei Einwirkung einer höheren Filtergeschwindigkeit auf  $v = 290$  m/d (Pfahl: k2-Z-VS-v290) ist eine Verlagerung von Zementleim in Form einer ausgebildeten Fahne im Schatten des Modellpfahls zu erkennen (Abb. 3.5b und c).

Infolge des hydraulischen Gefälles, das über den Pumpenkreislauf eingestellt wird, stellt sich sowohl eine horizontale als auch vertikale Geschwindigkeitskomponente im Versuchskasten ein. Das Material, das durch die horizontale Strömung erodiert ist, wurde durch die vertikale Strömungskomponente und die Schwerkraft in Richtung der Sohle abgetragen und lagerte sich dort in Form einer Fahne im Totwasserbereich des umströmten Körpers ab. Zusätzlich konnte beim Freilegen des Pfahles festgestellt werden, dass die Festigkeit der ausgebildeten Fahne mit zunehmendem Abstand vom Pfahlzentrum abnimmt. Demnach wird der Anteil des abgelagerten Zementleims im Porensystem des Bodens mit zunehmendem Abstand zum Zentrum geringer.

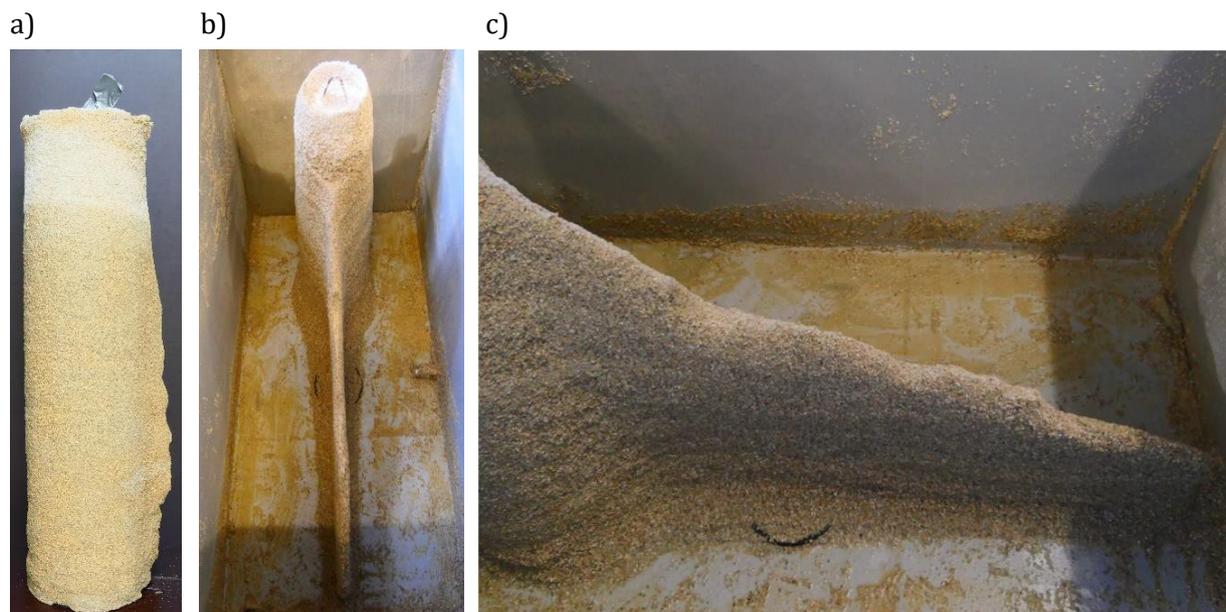


Abbildung 3.5: Modellpfähle aus Zementsuspension: a) Versuch: k1-Z-VS-v100, b) Versuch: k2-Z-VS-v290, c) Versuch: k2-Z-VS-v290 - Detail der ausgespülten Zementleimfahne

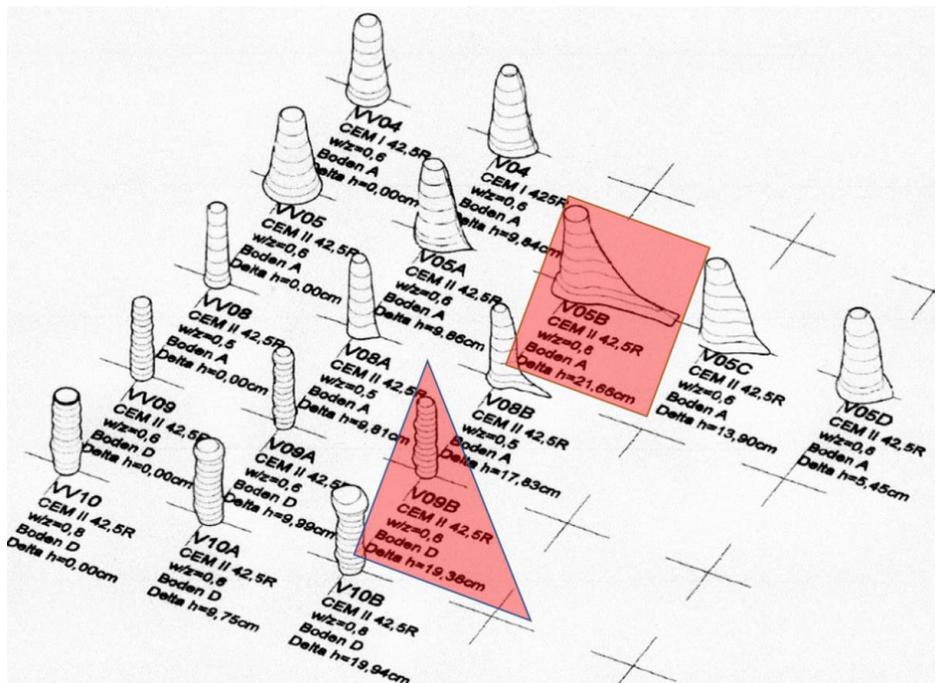


Abbildung 3.6: Übersicht der Versuchsergebnisse nach (Drzewiecki 2012), bearbeitet

Diese Erkenntnisse bestätigen die Ergebnisse aus (Drzewiecki 2012). In Abb. 3.6 sind die Ergebnisse der damals durchgeführten Versuchsreihen mit den zugehörigen Versuchsparametern dargestellt

Die Ausbreitung der Zementsuspension ohne Einwirkung einer Umströmung wurde im Vorfeld der jeweiligen Versuchsreihe untersucht. Diese Referenzsäulen (bezeichnet mit VV0X) waren quasi Nullmessungen, wobei die Zementsorte, der w/z-Wert, der Versuchsboden sowie die im Versuchskasten eingestellte, mittlere Potentialdifferenz variiert wurden.

Die Versuche von (Drzewiecki 2012) und die Modellpfähle dieser Versuchsreihe zeigen deutliche Ausspülungen von Zementleim in der Pfahlachse (Vergleich Versuch V09B mit k1-Z-VS-v100 und Versuch V05B mit Modellpfahl k2-Z-VS-v290). Mit steigender Filtergeschwindigkeit treten am Modellpfahl höhere Erosionserscheinungen bezüglich Form und Größe von Zementsäulen aus Frischsuspension ohne Gesteinskörnung auf.

### 3.3 Ergebnisdiskussion

Anhand der durchgeführten Laboruntersuchungen an Modellpfählen aus Beton und Zementleim wurde untersucht, ob an der Mantelfläche eines frisch betonierten Pfahls ein Abtrag bzw. eine Umlagerung von Zementleim infolge Wassererosion stattfindet. Vorläufig können daraus folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- a) Bei den suspensionsgestützt hergestellten Modellpfählen hat sich durch Abfiltrieren von Bentonit deutlich ein Filterkuchen ausgebildet. Nach Entfernen des Filterkuchens zeigte sich eine einwandfrei hergestellte Betonpfahloberfläche – ohne anhaftende Körnung. Der Durchmesser sowohl in als auch quer zur Strömungsrichtung war im Vergleich zu den verrohrt

hergestellten Pfählen am geringsten. Daraus kann gefolgert werden, dass die Bentonitstützung unter Ausbildung eines Filterkuchens eine Versiegelung bewirkt und somit die Umströmung die Betonoberfläche gar nicht erreichen und somit nicht erodieren kann.

- b) Die verrohrt hergestellten Pfähle zeigten - unabhängig von den Eingangsparametern wie hydraulisches Gefälle, Mischungsentwurf und Durchlässigkeit des Versuchsbodens - keine mit bloßem Auge erkennbare strömungsbedingte Umlagerung von Zementleim. Ein Vergleich der gemessenen Durchmesser zeigt, dass mit einer Zunahme der Umströmungsgeschwindigkeiten tendenziell etwas geringere Durchmesser auftreten. Demnach findet ein Abtrag von Zementleim statt – jedoch ist das Volumen des erodierten Zementleims minimal. Entsprechend kann ein negativer Einfluss der Strömung auf die Betonintegrität der Modellpfähle nicht festgestellt werden. Eine kritische Strömungsgeschwindigkeit, die sichtbare Ausspülungen an den Ortbeton-Modellpfählen verursachen könnte, konnte nicht erreicht werden.
- c) Die Auswertung der pH-Wert-Messungen während der Versuchsdurchgänge zeigte eine Verschiebung in den basischen Bereich, die auch auf das Ausspülen von Zement zurückzuführen ist. Ein Vergleich der aus den Messergebnissen ermittelten Stoffmenge, welche infolge der Umströmung des einzelnen Modellpfahls verlagert wurde, zeigte ebenfalls die Tendenz, mit steigender Filtergeschwindigkeit größer zu werden. Jedoch war es nicht möglich, über den pH-Wert die absolute ausgespülte Menge zurückzurechnen, um den Abtrag zu quantifizieren.

## 4 Numerische Simulationen

### 4.1 Einführung

Anhand der physikalischen Laborversuche an den Modellpfählen aus Ortbeton konnte gezeigt werden, dass eine Umströmung der Pfähle im Modellmaßstab mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten bis ca. 700 m/d noch keine signifikanten Ausspülungen von Zementleim an der Pfahlmantelfläche erzeugt.

Die Frage nach einem „zulässigen“ Grenzwert der Grundwasserfließgeschwindigkeit für eine schadensfreie Herstellung von Ortbetonpfählen im Maßstab der Großausführung konnte allein aus den im Modellmaßstab durchgeführten physikalischen Laborversuchen bisher nicht beantwortet werden. Daher wird hier ergänzend die Methode der numerischen Simulation herangezogen, um die bisherigen Erkenntnisse auf den Großmaßstab zu übertragen und somit mögliche strömungsinduzierte Auswaschungen an Ortbetonpfähle im Hinblick auf praxisrelevante Umströmungsgeschwindigkeiten während der Herstellung abzuschätzen.

Dazu wird das Open-Source Softwarepaket OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation) mit Lösungsalgorithmen, die auf der numerischen Strömungsmechanik (CFD) basieren, herangezogen. Bei Anwendung dieser Methode werden die Fluide (hier: Wasser, Zementleim, Frischbeton) in einer kontinuumsmechanischen Betrachtungsweise vereinfacht als homogene Fluide abgebildet.

## 4.2 Kalibrierung der rheologischen Fließgesetz-Parameter

Die Beschreibung des rheologischen Verhaltens von zementgebundenen Werkstoffen erfolgt üblicherweise mit dem Modell von Bingham, für das als Eingangsparameter die plastische Viskosität  $\eta_{pl}$  [Pa·s] und die Fließgrenze  $\tau_0$  [Pa] benötigt werden.

Die Bestimmung der Bingham-Modellparameter *Fließgrenze* und *pl. Viskosität* des verwendeten Pfahlmaterials erfolgt anhand des Kalibrierungsverfahrens nach (Fierenkothen 2019). Dabei wird in Laborversuchen die zeitabhängige Setzfließmaß-Entwicklung ermittelt und diese mit einer Datenbank verglichen, die auf einer Vielzahl an numerischen Simulationen dieses Laborversuchs im Maßstab 1:1 unter Variation der Fließgesetzparameter basiert. Der Parametersatz, der die beste Übereinstimmung mit dem Laborversuch liefert, wird dem geprüften Material zugeordnet. Für reine Zementleime erfolgt die Kalibrierung nach dem gleichen Kalibrierungsprozess – jedoch unter Verwendung des Hägermann-Trichters nach DIN EN 1015-3 als Prüfkonus.

## 4.3 Validierung des numerischen Codes

Vor Anwendung des numerischen Codes auf die hier zu untersuchende Fragestellung ist durch einen Validierungsprozess nachzuweisen, dass mit der gewählten numerischen Methode der Strömungsprozess und eine damit verbundene strömungsinduzierte Auswaschung des Pfahlmaterials abgebildet werden können. Dafür werden die Ergebnisse des Modellpfahles k2-Z-VS-v290 aus Zementleim herangezogen, da dieser die deutlichste Änderung der Pfahlkontur zeigte. Über einen Vergleich der an dem physikalischen Experiment ermittelten Daten mit den numerischen Ergebnissen im Modellmaßstab 1:1 wird der Nachweis der Validierung des numerischen Codes erbracht. Eine detaillierte Beschreibung der Berechnungen, die für die Validierung vorgenommen wurden, ist jedoch nicht Bestandteil dieses Beitrages, kann aber (Fierenkothen et al. 2020) entnommen werden.

## 4.4 Numerische Parameterstudie

### 4.4.1 Festlegung der Parameter

Zur Übertragung der bisherigen Erkenntnisse auf den Großmaßstab werden im Zuge der numerischen Untersuchungen Berechnungen an einem Modell mit dem Maßstab 1:5 (vgl. Laborversuche) und mit dem Maßstab der Großausführung (M 1:1) durchgeführt.

Dabei werden Filtergeschwindigkeiten von 1, 10, 100 und 1000 m/d angesetzt. Anhand der Laborversuche hatte gezeigt werden können, dass neben der Filtergeschwindigkeit auch das Pfahlmaterial Einfluss auf mögliche Auswaschungen hat. Aus diesem Grund wurden unterschiedlich fließfähige Frischbetone innerhalb der Konsistenzklasse F5 untersucht. Als Parameter zur Bewertung der Konsistenz der Frischbetone wurde das Ausbreitmaß  $a$  festgelegt und mit 56, 58, 60 und 62 cm variiert.

Für die Kalibrierung der für die Simulation notwendigen Fließgesetzparameter *pl. Viskosität* und *Fließgrenze* (entsprechend Kap. 4.2) müssen diesen Ausbreitmaßen die zugehörigen Setzfließmaße zugeordnet werden. Sowohl in (Fierenkothen 2019) als auch in (Kränkel 2018) wurden basierend

auf Untersuchungen mit Bohrpfahlbetonen ein funktionaler Zusammenhang  $a = f(SF)$  zur Umrechnung des Ausbreitmaßes  $a$  auf das Setzfließmaß  $SF$  entwickelt.

In Tab. 4.1 sind die auf beiden Funktionen basierenden (End-)Setzfließmaße dargestellt. Für den Kalibrierungsprozess wird ein aus beiden Funktionen gemitteltes Setzfließmaß  $\overline{SF}_{rech}$  bestimmt und mit der Datenbank aus (Fierenkothen 2019) verglichen. Der Parametersatz, der die beste Übereinstimmung im Hinblick auf das gemittelte (End-)Setzfließmaß liefert, wird dem jeweiligen Frischbeton für die numerische Berechnung zugewiesen.

Tabelle 4.1: Ausbreitmaße, Setzfließmaße und kalibrierte Fließgesetzparameter der untersuchten Frischbetone

Material	Ausbreitmaß $a$ [cm]	$SF_{rech}$ [cm] (Fierenkothen 2019)	$SF_{rech}$ [cm] (Kränkel 2018)	$\overline{SF}_{rech}$ [cm]	pl. Viskosität $\eta_{pl}$ [Pa·s]	Fließgrenze $\tau_0$ [Pa]
Beton	62	51,3	50,3	50,8	20	80
Beton	60	48,6	47,1	47,85	20	105
Beton	58	45,6	43,3	44,45	20	135
Beton	56	42,8	39,7	41,25	20	180

Weil die Umströmung der Pfahlkontur mit einer möglichen Auswaschung von Zementleim ein instationäres Strömungsproblem darstellt, ist es für die numerischen Simulationen erforderlich eine Berechnungsdauer festzulegen. Aus den oben festgelegten Ausbreitmaßen mit einer jeweiligen Differenz von  $\Delta a = 2,0$  cm wird die Berechnungsdauer über die Zeitspanne bestimmt, in der sich das Ausbreitmaß des Frischbetons um diese Differenz reduziert.

In (Böhle 2019) wurde diese zeitliche Veränderung des Ausbreitmaßes an Bohrpfahlbetonen untersucht und zu  $\Delta a = 4,2$  cm/h ermittelt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden dazu ebenfalls Versuche mit dem für die Modellpfähle verwendeten Frischbetonmischungsentwurf (GK16) durchgeführt. Danach ergibt sich eine Veränderung von  $\Delta a = 3,9$  cm/h, sodass die Ergebnisse von (Böhle 2019) annähernd bestätigt werden; entsprechend wird die Berechnungsdauer auf 30 Minuten festgelegt.

#### 4.4.2 Numerisches Modell

In Abb. 4.1 ist das numerische Modell im Modellmaßstab (M 1:5) mit dem Berechnungsnetz und den zugehörigen Bezeichnungen dargestellt. Die Randbedingungen werden wie folgt festgelegt: Zwecks Rechenzeitoptimierung wird die Achsensymmetrie ausgenutzt und nur eine Hälfte der Pfahlgeometrie unter Verwendung der Symmetrierandbedingungen modelliert. An dem Berechnungsnetzrand *inlet* wird die Strömung des Wassers im Porenraum über Vorgabe der Filtergeschwindigkeit gesteuert. Durch eine *outlet*-Randbedingung wird ein ungehinderter Ausfluss aus dem Berechnungsgebiet zugelassen. An den weiteren Berechnungsgebietsrändern wird eine reibungsfreie Randbedingung angesetzt.

Der Zweck dieser Parameterstudie ist die Quantifizierung einer möglichen strömungsbedingten Umlagerung des Frischbeton- bzw. Zementleimvolumens unter verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten. Infolge der Schwerkraft und somit infolge des hydrostatischen Überdrucks im Pfahlhohlraum findet in einem dreidimensionalen Modell- unter Berücksichtigung der Erdbeschleunigung – eine kontinuierliche horizontale Eindringung des zementgebundenen Werkstoffes in den Porenraum statt. Aufgrund der Vereinfachung, dass das Pfahlmaterial als homogenes Fluid abgebildet wird, wird diese Eindringung numerisch überschätzt. Daher wird das umgelagerte Volumen infolge der gravitationsbedingten Eindringung in dieser Parameterstudie vernachlässigt und demnach die Erdbeschleunigung nicht angesetzt. So kann das numerische Berechnungsnetz auf nur eine Elementscheibe in z-Richtung beschränkt werden.

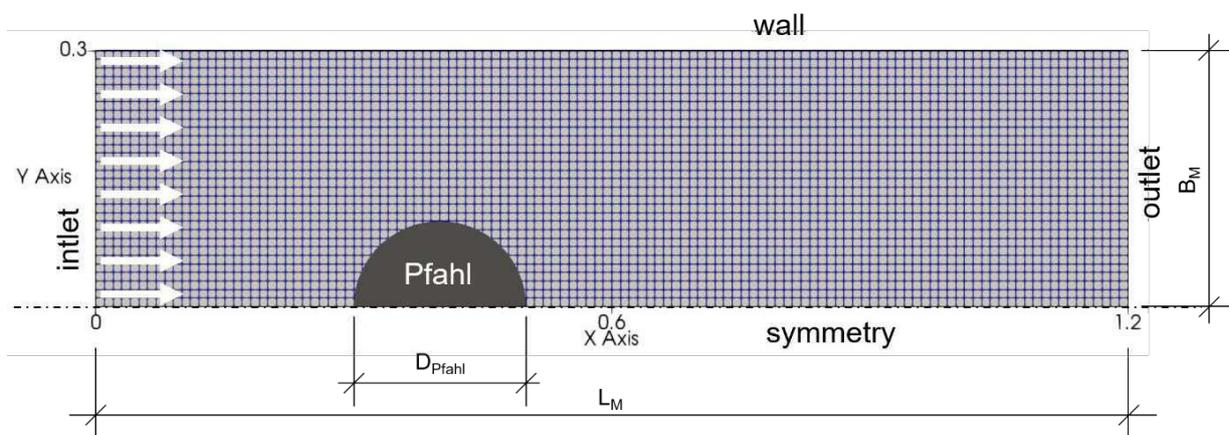


Abbildung 4.1: Grundriss des numerischen Modells mit Darstellung des Berechnungsnetzes für den Modellmaßstab (M 1:5)

#### 4.4.3 Numerische Berechnungen

Im Rahmen dieser Parameterstudie werden an den numerischen Modellen mit den Maßstäben M 1:5 und M 1:1 insgesamt 32 Berechnungen entsprechend Tab. 4.2 durchgeführt.

Tabelle 4.2: Numerische Berechnungen im Rahmen der Parameterstudie

Pfahldurchmesser $D$ [mm]	Maßstab	Ausbreitmaß $a$ [cm]	Filtergeschwindigkeit $v_f$ [m/d]
200	1:5	56, 58, 60, 62	1, 10, 100, 1000
1000	1:1	56, 58, 60, 62	1, 10, 100, 1000

#### 4.4.4 Ergebnis

Das Ergebnis einer numerischen Berechnung ist das Volumen in  $[m^3]$ , das sich infolge der Strömung nach einer Berechnungszeit von 30 Minuten von der ursprünglichen Pfahlgeometrie umgelagert hat. Dieses Volumen ergibt sich aus der Addition der anteiligen Volumina, die sich zum Zeitpunkt  $T_{\text{Sim}} = 30$  Minuten innerhalb des Berechnungsgebietes, aber außerhalb der ursprünglichen Pfahlgeometrie

befinden, und des Volumens, das während des Berechnungszeitraums aus dem System herausgetragen wurde.



Abbildung 4.2: Ergebnis der numerischen Simulation zum Zeitpunkt  $T_{\text{Sim}} = 1800$  s für den Maßstab der Großausführung mit  $a = 58$  cm und einer Filtergeschwindigkeit von 1 m/d (a) und 100 m/d (b)

Abb. 4.2 zeigt an dem Modell der Großausführung vergleichsweise das Ergebnis von zwei Simulationen zum Zeitpunkt  $T_{\text{Sim}} = 1800$  s. Dargestellt ist die Volumenverteilung eines Frischbetons ( $a = 58$  cm), der mit einer Filtergeschwindigkeit von (a) 1 m/d und (b) 100 m/d umströmt wurde. Daran ist zunächst erkennbar, dass bei einer Umströmung im Bereich von 1 m/d keine sichtbaren Auswaschungen vorhanden sind, aber bei einer Erhöhung der Filtergeschwindigkeit Auswaschungen in Form einer Zementfahne auftreten. Für eine bessere modellübergreifende Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird die Summe der Auswaschung in [Vol.-%] angegeben. Diese berechnet sich, indem das jeweilige berechnete umgelagerte Gesamtvolumen auf das ursprüngliche Volumen bezogen wird. Für die Simulation aus Abb. 4.2 a) ergeben sich somit Auswaschungen von 0,007 Vol.-% und für b) von 1,73 Vol.-%.

Die Ergebnisse der Simulationen an dem numerischen Modell im Labormaßstab sind in Abb. 4.3 a) dargestellt. Es zeigt sich, dass die Auswaschungen sowohl mit einer steigenden Fließgeschwindigkeit als auch mit einer Vergrößerung des Ausbreitmaßes ansteigen, aber diese – insbesondere für praxisrelevante Fließgeschwindigkeiten – sehr gering sind (zum Vergleich: eine Auswaschung von 0,1 Vol.-% würde einen Modellpfahldurchmesser von  $D = 0,2$  m nur um  $\Delta D = 0,1$  mm reduzieren).

Dass sich das Volumen der Auswaschungen deutlich bei Zementleim als Pfahlmaterial erhöht, zeigt Abb. 4.3 b). Vergleichsweise ist der Unterschied zwischen Zementleim, einem Beton mit einem Ausbreitmaß von  $a = 56$  cm und  $a = 62$  cm für unterschiedliche Filtergeschwindigkeiten dargestellt. Zur besseren Unterscheidbarkeit sind die Auswaschungen auf der y-Achse logarithmisch aufgetragen. Dies entspricht den Erkenntnissen aus den Laborversuchen, dass bei Modellpfählen aus Zementleim eine strömungsbedingte Umlagerung stattfindet, die eine deutliche Änderung der Pfahlkontur verursacht.

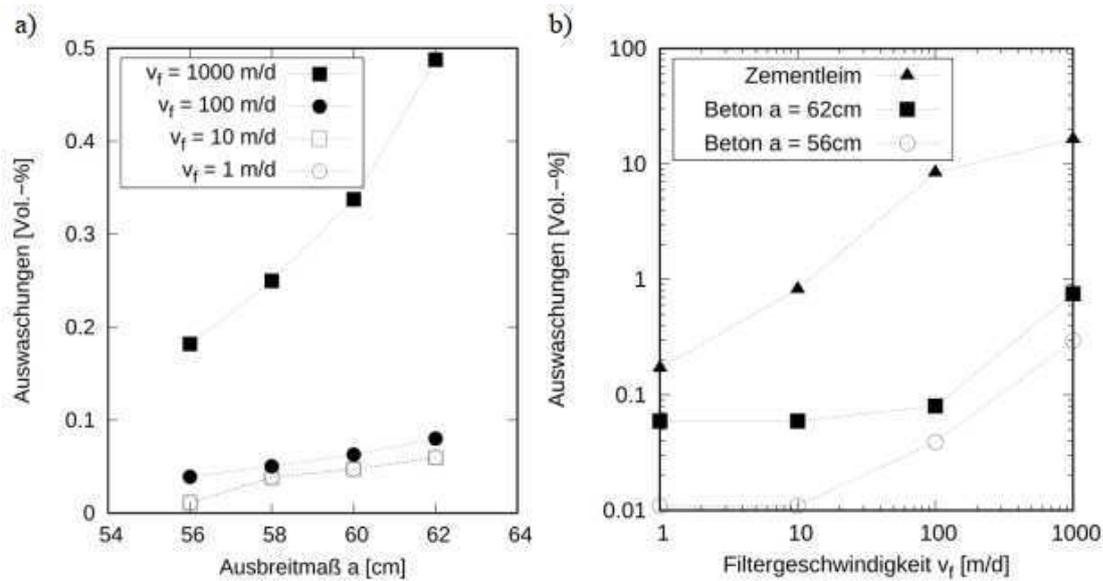


Abbildung 4.3: Ergebnis der numerischen Parameterstudie: Auswaschungen in [Vol.-%] im Modellmaßstab (a) und im Maßstab der Großausführung (b)

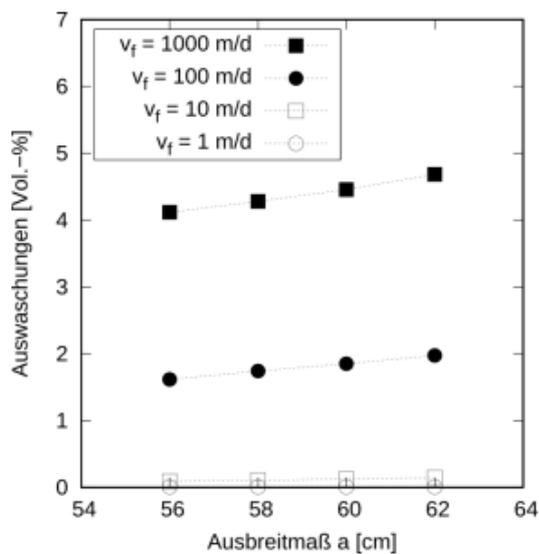


Abbildung 4.4: Ergebnis der numerischen Parameterstudie im Maßstab der Großausführung

Die Ergebnisse der Simulationen an dem numerischen Modell im Maßstab der Großausführung zeigt Abb. 4.4; dort spiegeln sich die an dem numerischen Modell im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse wider. Es zeigt sich ebenfalls, dass mit zunehmender Fließgeschwindigkeit und mit einer Vergrößerung des Ausbreitmaßes die rechnerischen Auswaschungen ansteigen. Dass zahlenmäßig größere Auswaschungen im Vergleich zu den Ergebnissen mit dem Modell im Maßstab 1:5 auftreten, erklärt sich durch die fünffach vergrößerte Pfahlmantelfläche. Nichtsdestotrotz sind die zu erwartenden Auswaschungen für praxisrelevante Fließgeschwindigkeiten sehr gering. Für eine Fließgeschwindigkeit von 10 m/d wird eine mittlere Auswaschung von 1,17 ‰ berechnet. Diese entspricht einer rechnerischen Reduktion des Pfahldurchmesser von  $\Delta D = 0,58$  mm und liegt damit weit unter den Herstellungstoleranzen für Bohrpfähle.

## 5 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Forschungsvorhaben wurde der mögliche Einfluss von strömendem Grundwasser auf die Frischbeton-Integrität von Ortbetonpfählen untersucht. Das Ziel war, einen schadensfrei „zulässigen“ Grenzwert für die Filtergeschwindigkeit des Grundwassers während der Herstellung von Ortbetonpfählen zu identifizieren.

Dazu wurden im geotechnischen Labor der Bergischen Universität Wuppertal Umströmungsversuche an Modellpfählen im Maßstab 1:5 durchgeführt, bei denen keine kritische Strömungsgeschwindigkeit erreicht werden konnte, die sichtbare Ausspülungen an den Betonkörpern verursacht, obwohl Filtergeschwindigkeiten erzielt werden konnten, die wesentlich über den praxisrelevanten Grundwassergeschwindigkeiten liegen.

Für die ebenfalls untersuchten Modellpfähle aus reinem Zementleim ohne Gesteinskörnung zeigten sich ab einer Strömungsgeschwindigkeit von 100 m/d deutliche Umlagerungen von Pfahlmaterial. Dies deckt sich mit Erkenntnissen eines früheren Forschungsvorhabens an der Bergischen Universität Wuppertal, in dem der Einfluss von strömendem Grundwasser auf Düsenstrahlsäulen untersucht worden war.

Um die Erkenntnisse aus den Laborversuchen an den Ortbeton-Modellpfählen auf den Maßstab der Großausführung übertragen und somit mögliche strömungsinduzierte Auswaschungen an großmaßstäblichen Ortbetonpfählen abschätzen zu können, wurden ergänzend numerische CFD-Simulationen durchgeführt. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die zu erwartenden Auswaschungen mit einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit und mit einer Verringerung der Frischbetonkonsistenz ansteigen, diese aber für praxisrelevante Fließgeschwindigkeiten vernachlässigbar gering sind.

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass ein qualitätsmindernder Einfluss von strömendem Grundwasser auf die Betonintegrität bei der Herstellung von Ortbeton-Bohrpfählen bei Filtergeschwindigkeiten des Wassers bis 100 m/d nicht zu erwarten ist.

## 6 Literatur

Brameshuber, W.; Vollpracht, A. (2009): Erarbeitung eines Bewertungskonzeptes zur Auslaugung aus Frischeton, Abschlussbericht. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Brown, D. A.; Turner, J. P.; & Castelli, R. J. (2010): Drilled Shafts: Construction Procedures and LRFD Design Methods. National Highway Institute U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (FHWA), Washington, D.C., <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/foundations/nhi10016/nhi10016.pdf> (Abruf: 16.12.2019).

- Böhle, B.: Untersuchungen im Großmaßstab zum Fließ- und Ansteifverhalten von Beton bei der Herstellung von Bohrpfählen. Berichte des Lehr- und Forschungsgebietes Geotechnik. Shaker-Verlag, Düren, 2019.
- DIN 18130-1 (1998): Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts.
- DIN EN 1015-3 (2007): Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch).
- DIN EN 1536 (2015): Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bohrpfähle.
- DIN EN 12699 (2015): Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Verdrängungspfähle; Deutsche Fassung EN 12699:2015.
- DIN EN 14199 (2015): Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Mikropfähle; Deutsche Fassung EN 14199:2015.
- Drzewiecki, M. (2012): Mögliche Auswirkungen von strömendem Wasser auf Form und Größe von Düsenstrahlsäulen. Diplomarbeit, Bergische Universität Wuppertal, Lehr- und Forschungsgebiet Geotechnik, Wuppertal. (unveröffentlicht)
- Fierenkothen genannt Kaiser, C. (2019): Numerische Simulationen und Laborversuche zur Ausbreitung von Frischbeton in Bohrpfählen. Berichte des Lehr- und Forschungsgebietes Geotechnik, Heft 38. Shaker-Verlag, Düren.
- Fierenkothen, C., Grebien, F., Pulsfort, M. (2020): Einfluss von strömendem Grundwasser auf die Betonintegrität von Ortbeton-Pfählen, Projekt-Abschlussbericht, Bergische Universität Wuppertal, Lehr- und Forschungsgebiet Geotechnik, Wuppertal im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau BAW, Wuppertal. (unveröffentlicht)
- FINNRA - Finnish Road Administration (2003): Instructions for drilled piling. Design and execution guide, Guidelines for design and implementation, Helsinki. [https://julka-isut.vayla.fi/sil-lat/julkaisut/drilledpiles\\_03.pdf](https://julka-isut.vayla.fi/sil-lat/julkaisut/drilledpiles_03.pdf) (Abruf: 16.12.2019).
- Kempfert, H.-G. (2013): Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ – EA-Pfähle. Ernst & Sohn, Berlin.
- Kränkel, T. (2018): Rheology and Workability Testing of Deep Foundation Concrete in Europe and the US. Research Report, Technical University of Munich - Centre for Building Materials, Munich.

Ritte, S. (2018): Einfluss von strömendem Grundwasser auf die Betonintegrität von Ortbeton-Pfählen. Masterarbeit, Bergische Universität Wuppertal, Lehr- und Forschungsgebiet Geotechnik, Wuppertal. (unveröffentlicht)

Westcott, F. J.; Lean, C. M. B. & Cunningham M. L.: Piling and Penetrative Ground Improvement Methods on Land Affected by Contamination: Guidance on Pollution Prevention, National Groundwater & Contaminated Land Centre report NC/99/73.

<http://www.merseygateway.co.uk/publicinquirydocs/Core-docs/CD-256.pdf>  
(Abruf: 16.12.2019).

## **Autoren**

Dr.-Ing. Claudia Fierenkothen  
Bergische Universität Wuppertal  
Pauluskirchstr. 7, 42285 Wuppertal  
fierenko@uni-wuppertal.de

Finja Grebien, M. Eng.  
Bergische Universität Wuppertal  
Pauluskirchstr. 7, 42285 Wuppertal  
grebien@uni-wuppertal.de

Dr.-Ing. Markus Herten  
Bundesanstalt für Wasserbau  
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe  
markus.herten@baw.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Pulsfort  
Bergische Universität Wuppertal  
Pauluskirchstr. 7, 42285 Wuppertal  
pulsfort@uni-wuppertal.de