

Sebastian Kube

# Untersuchung des Eindringverhaltens von Bentonitsuspensionen in kohäsionslose Böden mit elektrischen Widerstandsmessungen



SFB 837  
Interaktionsmodelle für den  
maschinellen Tunnelbau

Schriftenreihe des Instituts für  
Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2023-05

# **Untersuchung des Eindringverhaltens von Bentonitsuspensionen in kohäsionslose Böden mit elektrischen Widerstandsmessungen**

**Dissertation**

zur Erlangung des Grades

**Doktor-Ingenieur**

der

**Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften**

der

**Ruhr-Universität Bochum**

vorgelegt von

Sebastian Kube

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Thewes, Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Wichtmann, Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl für Bodenmechanik, Grundbau und Umweltgeotechnik

Tag der Einreichung: 14.11.2022

Tag der mündlichen Prüfung: 27.04.2023



Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:  
Geschäftsführender Direktor des  
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau  
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2023-5

**Sebastian Kube**

**Untersuchung des Eindringverhaltens von  
Bentonitsuspensionen in kohäsionslose Böden  
mit elektrischen Widerstandsmessungen**

Shaker Verlag  
Düren 2023

**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.: Bochum, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9104-5

ISSN 1614-4384

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Vorwort und Dank

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum. Meinem Doktorvater und Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes möchte ich meinen größten Dank aussprechen. Das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit der eigenständigen Bearbeitung des Forschungsthemas bildeten die Grundlage für die Ausarbeitung der Dissertation. Ständiger Zuspruch bei der herausfordernden Bearbeitung und angeregte fachliche Diskussionen haben letztendlich zur erfolgreichen Finalisierung der Dissertation geführt. Dafür bedanke ich mich rechtherzlich!

Ein großer Dank gilt auch meinem zweiten Gutachter, Herr Prof. Dr.-Ing. habil Torsten Wichtmann für das wissenschaftliche Interesse an meiner Arbeit und den fachlichen Austausch. Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg danke ich herzlich für die Übernahme der Leitung der Promotionskommission als fachfremder Gutachter.

Diese Arbeit entstand im Rahmen der Mitarbeit im Sonderforschungsbereich (SFB) 837. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Kolleg\*innen im SFB bedanken. Ganz besonders ist Dr.-Ing. Britta Schößer als Projektleiterin und Arbeitskollegin hervorzuheben. Die Zusammenarbeit im Teilprojekt A6 sowie die Organisation von labortechnischen Aktivitäten kann ich als hervorragend bezeichnen.

Vier Jahre am TLB haben sich besonders durch tolle Kolleg\*innen ausgezeichnet. Unabhängig von der Problemstellung werden Hilfestellungen angeboten und jeder wird bei seiner Arbeit unterstützt, wenn es notwendig ist. Hierfür möchte ich meinen ehemaligen Kolleg\*innen Götz Vollmann, Hendrik Wahl, Tim Göbel, Alena Conrads, Ivan Popovic, Peter Hoffmann, Zdenek Zizka, Ngoc Anh Pham, Nils Gramlich, Judith Berns, Joline Pechtl und Fabiana Ochs danken.

Des Weiteren möchte ich Thorsten Gökpınar danken. Ohne ihn und sein unermüdlicher Wille, die für meine Arbeit notwendige Messtechnik zu verbessern, wäre eine derart produktive Durchführung meiner experimentellen Untersuchungen nicht möglich gewesen.

Ein besonderer Dank gilt Carina Bessel. Als ehemalige wissenschaftliche Hilfskraft hat sie mich tatkräftig im Labor und bei der Erstellung verschiedenster Grafiken für meine Dissertation unterstützt. Auch nach ihrer aktiven TLB Zeit stand Sie mir noch als Germanistik-Ass zur Seite und dabei geholfen, meine Dissertation sprachlich zu verbessern.

Den Grundstein für meine Promotion am TLB hat am Ende Anna-Lena Hammer gelegt. Die Betreuung meiner Masterarbeit in ihrer wohl stressigsten Phase kurz vor Abgabe der Dissertation war ein holpriger Beginn unserer Zeit als Arbeitskollegen. Schlussendlich hat Sie mich zum TLB gelotst und war zu jedem Zeitpunkt für mich da und stand stets mit Rat und Tat zur Seite. Ich habe Anna viel zu verdanken und bin gespannt, wie sich der männliche Part der Familie Hammer als Vorgesetzter schlägt.

Sascha Freimann und Marius – 2/3 der Hot Boys – haben sehr großen Anteil daran, dass der Spaß am TLB nicht zu kurz gekommen ist. Immer wettkampforientiert, ob beim Minigolf, Kart, Quartett, Schocken oder auch unangekündigten NERF-Gun Duellen auf dem Flur werde ich Euch besonders für die unvergessliche Zeit unserer nicht ganz so erfolgreichen Glücksspielkarriere in Erinnerung behalten. Aber auch auf beruflicher Ebene, egal ob es um fachliche Diskussionen oder

---

die penible Arbeit an formattechnischen Fragestellungen ging – Sascha und Marius konnte ich immer fragen.

Arbeit an der Uni ist unwiderruflich auch mit einer Lehrtätigkeit verbunden. „M20 forever“ oder auch „M20 bla bla“ sind nur einige der gemeinsamen Chatgruppen mit Annika Jodehl und Christian Rhein. Ich möchte den beiden für die gemeinsamen Jahre am TLB und die ununterbrochene Unterstützung danken! Besonders in der Endphase der Promotion kann ich mich nicht als den besten Kollegen bezeichnen – Annika und Christian haben sich davon nicht beeindrucken lassen und geholfen, wo es nur ging.

Experimentelle Forschung und Laborarbeit sind ohne die Unterstützung von studentischen und wissenschaftlichen Hilfskräften nicht möglich. Daher möchte ich an dieser Stelle besonders Max Lucht, Matthias Rengshausen, Henrike Schülke, Inge Friesen, Pascal Schramme und Djalili Zougou danken.

Ein ganz besonderer Dank gilt Peter Vogt, der mich in den letzten 2 Jahren als Mentor unterstützt hat. Als fachfremder Diskussionspartner und akribischer Korrekturleser meiner Arbeit hat Peter großen Anteil an dieser Dissertation. Ich bedanke mich herzlich für die geopferte Zeit und das Interesse an meiner Arbeit. Ich sehe es als nicht selbstverständlich an, bin sehr froh über die Möglichkeit mit Peter zusammengearbeitet zu haben.

Zu Beginn und vor allem während des Studiums sind Freunde das A & O. Meine besten Freunde sind noch immer diejenigen, die ich in der Erstiwoche kennengelernt habe. Bis heute kann ich auf die Unterstützung von vielen Weggefährten zählen. An dieser Stelle möchte ich Julian, Denise, Anna und Wiebke hervorheben, die zu jeder Zeit für mich da sind und mich unterstützen. Danke auch an meine Kollegen des MGC Dormagen-Brechten, insbesondere an meine langjährigen Wegbegleiter Brezel, Robin, Patrick und Alex. Der sportliche Ausgleich und die Zeit mit Euch haben mir geholfen, aus dem Alltag zu entfliehen und die Dissertation am Wochenende zu vergessen.

Schließlich möchte ich meiner Mutter Claudia und meinem leider viel zu früh verstorbenen Vater Frank – Papa, diese Arbeit ist für dich! Weiterhin danke ich meinem Bruder Max, der besonders in den letzten schwierigen Jahren immer da war. Unermüdliche Unterstützung und der ungebändigte Glaube, dass ich die Herausforderung der Promotion meistern werde, haben mir immer ein gutes Gefühl und Sicherheit gegeben. Zudem möchte ich meinen Schwiegereltern Birgit und Christian für den ständigen Zuspruch und die Unterstützung danken.

Der allergrößte Dank gilt meiner Frau Solveig. Das Korrekturlesen meiner Dissertation und Anhören von Probenvorträgen würde ich nicht zu ihren besonderen Hobbys zählen – trotzdem hat Sie mich tatkräftig bei der Promotion unterstützt. Solveig hat mir stets den Rücken freigehalten und alle Launen der letzten Monate ertragen. Ich weiß manchmal selbst nicht, wie sie das geschafft hat. Erst vor knapp einem Jahr haben wir geheiratet und ich habe in der finalen Phase meiner Dissertation wieder gemerkt, warum. Sollys ununterbrochener Zuspruch und die Tatsache, dass sie mir zu jeder Zeit verschiedenste Arbeiten abgenommen hat, haben mir extrem geholfen und dafür werde ich Dir immer dankbar sein. Ich freue mich riesig auf die kommenden Jahre!

Bochum, im Mai 2023

Sebastian Kube

---

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort und Dank</b> .....	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>v</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>viii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xvi</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis</b> .....	<b>xx</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>xxv</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>xxvi</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung und wissenschaftliches Vorgehen .....	2
1.3 Gliederung der Arbeit .....	3
<b>2 Ortsbruststabilität beim Flüssigkeitschildvortrieb</b> .....	<b>7</b>
2.1 Maschineller Vortrieb mit Flüssigkeitsstützung .....	7
2.1.1 Aufbau und Einsatzbereiche einer TBM mit Flüssigkeitsstützung .....	7
2.1.2 Schneidwerkzeuge und Schneidvorgang .....	10
2.1.3 Anforderungen an die Stützflüssigkeit .....	13
2.2 Versagensmechanismen .....	15
2.2.1 Mögliche Versagensarten .....	15
2.2.2 Bruchkörpermodell nach Horn (1961) .....	17
2.3 Stützmechanismen .....	18
2.3.1 Stützdruckübertragungsmechanismen .....	19
2.3.2 Zusammenspiel von Abbauvorgang und Stützung .....	21
2.3.3 Wechselwirkungen zwischen Bentonitsuspension und Baugrund .....	23
2.4 Grundlagen der Stützdruckberechnung .....	31
<b>3 Interaktionen von Lockergestein und Bentonitsuspensionen</b> .....	<b>35</b>
3.1 Grundlegende Eigenschaften von Lockergestein .....	35
3.2 Grundlegende Eigenschaften von Bentonitsuspensionen .....	37
3.2.1 Struktur .....	38
3.2.2 Wasseraufnahmevermögen .....	39
3.2.3 Herstellung von Bentonitsuspensionen .....	40
3.2.4 Rheologie .....	41
3.2.5 Messgeräte zur Ermittlung von Suspensionsparametern .....	44
3.3 Penetrationsverhalten von Bentonitsuspensionen in Lockergestein .....	49
3.4 Experimentelle Nachweismethoden des Penetrationsverhaltens .....	54

---

---

<b>4</b>	<b>Geoelektrische Widerstandsmessungen zur Charakterisierung von Lockergestein und Porenflüssigkeit .....</b>	<b>57</b>
4.1	Geoelektrische Grundlagen.....	57
4.1.1	Elektrotechnischer Hintergrund.....	57
4.1.2	Messprinzip Gleichstromgeoelektrik.....	62
4.2	Anwendungsbeispiele geoelektrischer Messverfahren .....	66
4.2.1	Haupteinsatzgebiete.....	66
4.2.2	Erweiterte Einsatzgebiete .....	68
4.2.3	Tunnelbau .....	70
4.3	Anwendbarkeit (geo)elektrischer Widerstandsmessungen im Tunnelbau .....	73
<b>5</b>	<b>Versuchsansatz zur Ermittlung des elektr. Widerstands von wasser- und suspensionsgesättigten Böden.....</b>	<b>75</b>
5.1	Zweistufige Entwicklung von Messzellen zur Ermittlung des elektrischen Widerstands .....	75
5.1.1	Messzelle mit einer Messebene (Messzelle A).....	76
5.1.2	Messzelle mit drei Messebenen (Messzelle B).....	79
5.2	Versuchskonzept .....	83
5.3	Materialien .....	83
5.3.1	Fluide.....	84
5.3.2	Sande und Kiese .....	87
5.3.3	Boden-Suspensions-Mischungen.....	89
5.4	Elektrische Widerstandsmessungen (Messzelle A) .....	89
5.4.1	Fluide.....	89
5.4.2	Wassergesättigte Böden.....	91
5.4.3	Boden-Suspensions-Mischungen.....	92
5.4.4	Zusammenfassung .....	93
5.5	Elektrische Widerstandsmessungen (Messzelle B).....	94
5.5.1	Fluide.....	94
5.5.2	Wassergesättigte Böden.....	95
5.5.3	Boden-Suspensionsmischungen .....	96
5.5.4	Zusammenfassung .....	100
5.6	Fazit.....	100
<b>6</b>	<b>Laborversuche zur Analyse der Partikelablagerung von Bentonit in Lockergestein .....</b>	<b>101</b>
6.1	Entwicklung eines Versuchsstandes .....	101
6.1.1	Messzelle C .....	101
6.1.2	Messtechnik Hardware .....	103
6.1.3	Messtechnik Software.....	105
6.1.4	Versuchsaufbau .....	106
6.2	Versuchskonzept .....	107
6.3	Materialien .....	108
6.4	Auswertungsmethodik .....	109

---

6.5 Elektrische Widerstandsmessungen (Messzelle C).....	110
6.5.1 Penetrationsversuche mit vollständiger Penetration des Bodenkörpers – Funktionalitätsprüfungen.....	111
6.5.2 Penetrationsversuche unter Variation des Feststoffgehalts der Bentonitsuspension bei konstantem Überdruck.....	122
6.5.3 Penetrationsversuche unter Variation des Überdrucks bei konstantem Feststoffgehalt der Bentonitsuspension.....	132
6.5.4 Auswertung der elektr. Widerstände von wasser- und suspensionsgesättigten Böden ....	139
6.6 Fazit.....	143
<b>7 Analyse des Feststoffgehalts von bentonitpenetrimtem Lockergestein.....</b>	<b>145</b>
7.1 Einfluss der Partikelablagerung auf die Druckübertragungszone.....	145
7.2 Entwicklung der experimentell abgeleiteten Fließgrenze des Porenfluids von Böden über die Eindringtiefe einer Bentonitsuspension .....	148
7.2.1 Vorgehensweise.....	149
7.2.2 Ergebnisse Boden 0,5-1,0 mm .....	152
7.2.3 Ergebnisse Boden 0,063-4,0 mm .....	154
7.2.4 Ergebnisse Boden 1,0-2,0 mm .....	154
7.2.5 Gegenüberstellung der Abhängigkeiten des elektrischen Widerstands von der tiefenabhängigen Fließgrenze $\tau_{f,exp}$ .....	156
7.3 Auswirkung der veränderten theoretischen Fließgrenze auf die wirksame Stützdruckübertragung .....	157
7.4 Nichtlinearer Ansatz für den Stagnationsgradienten $f_{s0}$ .....	161
7.5 Fazit.....	163
7.5.1 Einschränkungen der Methodik.....	163
7.5.2 Mögliche Ursachen für die Nichtanwendbarkeit der vorgestellten Methodik bei verschiedenen Böden.....	164
7.5.3 Mögliche Anpassungen sowie Validierung der Untersuchungsmethodik.....	165
<b>8 Empfehlungen für die Praxis.....</b>	<b>167</b>
8.1 Abschätzung der Eindringtiefe in Verbindung mit dem Stützmechanismus .....	167
8.2 Einsatz der Methodik als Alternative zu bisherigen Untersuchungsmethoden.....	169
8.3 Partikelablagerung und deren Auswirkung.....	170
<b>9 Fazit .....</b>	<b>173</b>
9.1 Zusammenfassung.....	173
9.2 Ausblick .....	177
<b>10 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>181</b>
<b>11 Anlagen.....</b>	<b>A-1</b>
<b>12 Lebenslauf .....</b>	<b>A-187</b>