

Anna-Lena Hammer

Untersuchungen zum Einsatz von Stauchelementen in einer nachgiebigen Spritzbetonschale bei druckhaften Gebirgsverhältnissen

Schriftenreihe des Instituts für
Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2018-05

**Untersuchungen zum Einsatz von Stauchelementen in einer
nachgiebigen Spritzbetonschale bei druckhaften Gebirgsverhältnissen**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieurin

der

Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

der

Ruhr-Universität Bochum

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Anna-Lena Hammer

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

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. R. Galler, Montanuniversität Leoben
Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Tag der Einreichung: 17.04.2018

Tag der mündlichen Prüfung: 24.07.2018

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

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

Heft 2018-5

Anna-Lena Hammer

**Untersuchungen zum Einsatz von Stauchelementen
in einer nachgiebigen Spritzbetonschale bei
druckhaften Gebirgsverhältnissen**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6248-9

ISSN 1614-4384

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort und Dank

Die vorgelegte Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum entstanden. Dem Lehrstuhlinhaber und meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes, gebührt größter Dank. Durch seine intensive Betreuung und das mir entgegen gebrachte Vertrauen konnte ich stets eigenständig meine Ideen und Ziele verfolgen. Der gemeinsame fachliche Austausch und die vielen Diskussionen haben maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Ein großer Dank gilt auch meinem zweiten Gutachter, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler, der mir während der Bearbeitungszeit mit fachlichen Diskussionen, vielen Anregungen und ausgezeichnete Unterstützung bei meinem Versuchsprogramm hilfreich zur Seite stand. Herrn Prof.-Dr. Ing. Radenberg danke ich herzlich für die Übernahme der Leitung der Promotionskommission als fachfremder Gutachter.

Einen großen Teil zum Gelingen der Arbeit hat die sehr freundschaftliche Atmosphäre am Lehrstuhl beigetragen. Auch in schwierigen und anstrengenden Phasen war es immer schön zur Arbeit zu kommen – die gesamte TLB-Familie hat mich stets motiviert und mir Rückhalt gegeben. Daher freue ich mich sehr, dass ich noch für weitere drei Jahre am Lehrstuhl arbeiten werde und weiterhin Teil dieses tollen Teams sein darf.

Bedanken möchte ich mich ausdrücklich bei Marie Bayer, die als studentische Hilfskraft mit ihrer gewissenhaften Zuarbeit eine große Unterstützung bei meiner Arbeit gewesen ist. Außerdem gebührt meinen Kollegen Marius Schröder und Zdenek Zizka ein herzlicher Dank für den wertvollen fachlichen Input und den konstruktiven Austausch.

Bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen habe ich mich immer auf die Mitarbeiter der Konstruktionsteilprüfung verlassen können. Besonders hervorheben und bedanken möchte ich mich dabei bei Dieter Abraham für die akribische Vorbereitung und Durchführung der Spritzbetonversuche. Recht herzlich möchte ich mich auch bei Jörg Kranz für die Durchführung der Kriechversuche am Lehrstuhl für Subsurface Engineering bedanken.

Notwendige Informationen zum Bau des Tauerntunnels habe ich von Alexander Gebhardi erhalten, der mich darüber hinaus von Anfang an für die Thematik zu begeistern wusste. Dafür möchte ich mich herzlich bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen lieben Freunden Peter Vogt und Mario Galli, die sich viel Zeit für die akribische Durchsicht meiner Konzepte und Texte genommen haben und mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen. Meiner besten Freundin Rebekka Winkler gebührt riesengroßer Dank. Sie hat sich immer Zeit für fachliche Diskussionen genommen

und mir mit ihren wertvollen, sowohl inhaltlichen als auch persönlichen Ratschlägen, sehr bei der Vollendung dieser Arbeit geholfen.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Meine liebevollen Eltern, Birgit und Michael Wiese, und meine kleine Schwester, Lisa Wiese, waren immer für mich da. Ohne die großartige Hilfe meiner wunderbaren Mutter, die mich jederzeit moralisch unterstützt und mir stets den Rücken freigehalten hat, hätte ich den Spagat zwischen Arbeit und Familie nicht mit gutem Gewissen schaffen können. Sie hat ihre eigenen Verpflichtungen dabei oft hinten angestellt. Ein großer Dank gebührt auch meinen Schwiegereltern, Anke und Karl-Heinz Hammer, die in stressigen Zeiten immer spontan eingesprungen sind, wenn ihre Unterstützung gefragt war. Es ist ein großes Glück, eine so tolle Familie zu haben.

Meinem Mann Lutz und meinem Sohn Mats Linus gebührt der größte Dank. Sie haben mich zu Hause stets aufgeheitert und mich schnell auf andere Gedanken gebracht – ihre Liebe hat mich durch die anstrengende Zeit getragen. Sie mussten an vielen Tagen ein eingeschränktes Familienleben akzeptieren und haben das mit Bravour gemeistert, umso mehr freue ich mich auf die gemeinsame Zeit mit meiner Familie.

Herne, im April 2018

Anna-Lena Hammer

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Dank	iii
Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	x
Tabellenverzeichnis	xix
Abkürzungsverzeichnis	xx
Formelverzeichnis	xxi
Kurzfassung	xxv
Abstract	xxvii
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung und wissenschaftliches Vorgehen	2
1.3 Gliederung der Arbeit	4
2 Druckhaftes Gebirgsverhalten	8
2.1 Geotechnische Einflussfaktoren bei druckhaftem Gebirgsverhalten	8
2.1.1 Geologische Aspekte	9
2.1.2 Einfluss des Trennflächengefüges.....	10
2.1.3 Einfluss des Porenwassers auf das mechanische Verhalten	11
2.1.4 Einfluss des Kriechverhaltens.....	13
2.1.5 Spannungumlagerung infolge Gefügestörung	14
2.1.6 Diskussion.....	16
2.2 Definition des druckhaften Gebirgsverhaltens	17
2.2.1 Empirische Ansätze	17
2.2.2 Semi-empirische Ansätze	19
2.2.3 Ausbauorientierter Ansatz.....	24
2.2.4 Diskussion.....	27
2.3 Forschungsschwerpunkte zum druckhaften Gebirgsverhalten	28
3 Ausbaumethoden in druckhaftem Gebirge	30
3.1 Statische Konzepte zur Dimensionierung der Außenschale.....	30
3.1.1 Widerstandsprinzip	30
3.1.2 Ausweichprinzip	32
3.1.3 Diskussion der Ausbaukonzepte	36
3.2 Elemente der nachgiebigen Spritzbetonbauweise mit Stauelementen	38
3.2.1 Spritzbeton.....	38
3.2.2 Systemankerung.....	41
3.2.3 Nachgiebige Stahlprofile.....	43
3.2.4 Stauelemente	44
3.3 Tragverhalten des Gesamtsystems	50

3.4	Forschungsschwerpunkte zum Systemverhalten.....	52
4	Modelle zur Berechnung des Systemverhaltens in druckhaftem Gebirge.....	55
4.1	Berechnungsmethoden im konventionellen Tunnelbau	55
4.1.1	Analytische Methoden.....	56
4.1.2	Numerische Methoden.....	61
4.2	Berücksichtigung von Materialeigenschaften der Ausbauelementen	62
4.2.1	Zeitabhängige Materialeigenschaften von Spritzbeton.....	63
4.2.2	Anker.....	65
4.2.3	Stauchelemente	66
4.2.4	Diskussion.....	67
4.3	Forschungsschwerpunkte zur Anwendung der Berechnungsmethoden	68
5	Experimentelle Untersuchungen der Ausbauelemente Spritzbeton und Stauchelemente . 71	
5.1	Notwendigkeit experimenteller Untersuchungen	71
5.2	Entwicklung eines empirischen Prognosemodells zur Bestimmung der Spritzbetonfestigkeit	71
5.2.1	Datengrundlage	72
5.2.2	Auswertung der Festigkeitsentwicklungen.....	73
5.2.3	Analyse der mathematischen Modelle zur Bestimmung der Festigkeitsentwicklungen von Spritzbeton	79
5.2.4	Empirisches Prognosemodell für Spritzbetonfestigkeiten	84
5.2.5	Gegenüberstellung des empirischen Prognosemodells und der mathematischen Ansätze	87
5.2.6	Diskussion.....	91
5.3	Untersuchung zeitabhängiger Materialeigenschaften von Spritzbeton.....	92
5.3.1	Konzeption der Untersuchungen	92
5.3.2	Versuchsaufbau	95
5.3.3	Versuchsdurchführung.....	96
5.3.4	Ergebnisdarstellung und Analyse der Daten	102
5.3.5	Diskussion.....	112
5.4	Vergleichende Untersuchungen zum Systemverhalten von Stauchelementen	113
5.4.1	Konzeption der Untersuchungen	113
5.4.2	Numerische Vorüberlegungen zum Versuchsaufbau	116
5.4.3	Versuchsaufbau	120
5.4.4	Ergebnisdarstellung und Analyse der Versuchsergebnisse	121
5.4.5	Vergleichende Interpretation der Versuchsergebnisse.....	128
5.5	Diskussion der Untersuchungsergebnisse und Interpretation der Ergebnisse im Hinblick auf des Gesamttragverhalten	130
6	Prognose von druckhaftem Gebirgsverhalten	132
6.1	Berechnungsmethoden	132
6.2	Überprüfung der Definitionen anhand des Referenzprojekts Tauertunnel	132
6.2.1	Analyse der aufgetretenen Konvergenzen	133
6.2.2	Analyse der Definitionen	136
6.2.3	Diskussion und Zusammenfassung.....	138
6.3	Anwendung des KLV in druckhaftem Gebirge unter Verwendung eines entwickelten MATLAB-Berechnungsmodells.....	138

6.3.1	Beschreibung des entwickelten MATLAB-Berechnungsmodells zur Anwendung des KLV	139
6.3.2	Anwendung des MATLAB-Berechnungsmodells zur Validierung der Kennlinien am Beispiel des Tauerntunnels	146
6.3.3	Implementierung des empirischen Prognosemodells für Spritzbetonfestigkeiten und der Stauelemente in das KLV	150
6.3.4	Diskussion zum Einsatz des KLV in druckhaftem Gebirge.....	155
6.4	KLV-Parameterstudie zum Einfluss der geotechnischen Randbedingungen auf die Verschiebungsentwicklung.....	156
6.4.1	Wahl von geotechnischen Randbedingungen	156
6.4.2	Auswertung der Parameterstudie hinsichtlich radialer Endverschiebung und plastischem Radius.....	157
6.4.3	Diskussion der Parameterstudie hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf andere Projekte	160
6.5	Diskussion der Anwendbarkeit von analytischen Berechnungsmethoden in druckhaftem Gebirge..	160
7	Einfluss der geotechnischen Randbedingungen in druckhaftem Gebirge auf die nachgiebige Spritzbetonschale	162
7.1	Numerische Berechnungsmodelle für den Tunnelvortrieb.....	162
7.2	Beschreibung des gewählten zweidimensionalen Berechnungsmodells.....	162
7.2.1	Implementierung der geologischen Randbedingungen.....	163
7.2.2	Implementierung des nachgiebigen Ausbaus mit geschlitzter Spritzbetonschale, Stauelementen und Systemankerung.....	163
7.2.3	Darstellung des Gesamtmodells	165
7.2.4	Bauzustände und Berechnungsphasen	167
7.3	Validierung des Ausgangsmodells	168
7.3.1	Referenzquerschnitt.....	169
7.3.2	Auswertung der Berechnungsergebnisse.....	170
7.3.3	Vergleich der numerischen und analytischen Berechnungsergebnisse.....	172
7.4	Parameterstudie zum Einfluss der geotechnischen Randbedingungen auf das Systemverhalten der nachgiebigen Spritzbetonschale	172
7.4.1	Untersuchungspunkte	173
7.4.2	Einfluss der geologischen Faktoren.....	174
7.4.3	Einfluss des gewählten Interfaces zwischen Gebirge und Spritzbeton	181
7.4.4	Einfluss der Überlagerungshöhe des Gebirges	183
7.4.5	Diskussion.....	184
7.5	Diskussion der Berechnungsergebnisse und der Konsequenzen für dreidimensionale Modelle	185
8	Dreidimensionale numerische Analyse des Systemverhaltens eines nachgiebigen Ausbaus mit Stauelementen.....	186
8.1	Systemverhalten eines nachgiebigen Spritzbetonausbaus	186
8.2	Beschreibung des gewählten dreidimensionalen Berechnungsmodells.....	186
8.2.1	Darstellung des Gesamtmodells	187
8.2.2	Implementierung der geologischen Randbedingungen.....	187
8.2.3	Implementierung des nachgiebigen Ausbaus mit geschlitzter Spritzbetonschale, Stauelementen, Gitterträgern und Systemankerung	187
8.2.4	Bauzustände und Berechnungsphasen.....	191

8.3	Auswertung der Berechnungsergebnisse	192
8.3.1	Analyse der Konvergenzen und Gegenüberstellung mit den gemessenen Daten	192
8.3.2	Spannungsumlagerungen im Baugrund und in der Spritzbetonschale während des Vortriebs	193
8.4	Analyse des kinematischen Gesamtsystems	194
8.5	Interaktionsfläche Gebirge – Spritzbeton – Stauchelement	198
8.6	Diskussion der Ergebnisse mit den zwei- und dreidimensionalen Berechnungsmodellen	200
9	Empfehlungen für den nachgiebigen Ausbau in der Praxis	202
9.1	Erkenntnisse aus den Untersuchungen	202
9.2	Dimensionierung von Stauchelementen in der Projektierung	202
9.2.1	Auswahl des Last-Verformungsverhaltens	203
9.2.2	Hinweise zur Handhabung	206
9.3	Berechnungsmodelle für die jeweilige Leistungsphase	207
9.3.1	Berücksichtigung in der Vorplanung	208
9.3.2	Berücksichtigung in der Entwurfsplanung	209
9.3.3	Berücksichtigung in der Ausführungsplanung	210
9.3.4	Berücksichtigung in der Bauausführung	211
10	Fazit	213
10.1	Zusammenfassung	213
10.2	Ausblick	217
11	Literaturverzeichnis	222
12	Anlagen	A.1
13	Lebenslauf	A.35
