

Dustin Konertz

Tragverhalten räumlich beanspruchter Ankerschienen

Schriftenreihe des Instituts für
Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2021-03

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Tragverhalten räumlich beanspruchter Ankerschienen

vorgelegte

Dissertation

zur

**Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

der

**Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der
Ruhr-Universität Bochum**

von

Dustin Konertz, M. Sc.

Bochum, im Januar 2021

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

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

Heft 2021-3

Dustin Konertz

Tragverhalten räumlich beanspruchter Ankerschienen

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8100-8

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 • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Ankerschienen sind linienförmige Befestigungsmittel, die aus einem c-förmigen Stahlprofil mit rückseitig angebrachten Ankern bestehen. Sie werden verwendet, um Belastungen aus Anbaubauteilen in Betonstrukturen einzuleiten. Zu diesem Zweck werden Schrauben an beliebiger Position entlang der Schienenachse eingesetzt. Zusätzlich zu Quer- und Zugbelastungen senkrecht zur Schiene können sogenannte Zahnschienen auch Belastungen in Längsrichtung der Schiene aufnehmen. Ebene oder räumliche Belastungen resultieren aus diesen Komponenten bei gleichzeitiger Einwirkung. Im Vergleich zu achsengetrennten Belastungen können diese zu Interaktionseffekten führen, die das Tragverhalten beeinflussen.

Das Tragverhalten räumlich beanspruchter Ankerschienen mit Anteilen in Längsrichtung wurde in der Literatur bisher nicht untersucht und steht daher im Fokus dieser Arbeit. Wesentliche Entwicklungen erfolgen für die realitätsnahe Beschreibung der Interaktionseinflüsse bei Betonversagen, indem Interaktionsgleichungen für ein Bemessungsmodell entwickelt werden. Die Gleichungen basieren auf den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen, für deren Durchführung ein universeller Versuchstand entwickelt wird. Dessen Grundidee besteht darin, die Last mit nur einem Prüfszylinder aufzubringen und die Lastrichtung über horizontale und vertikale Rotationen von Probekörper bzw. Prüfszylinder einzustellen. Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse mittels Regressionsanalysen führt zur Ermittlung von Interaktionsgleichungen bei ebenen und räumlichen Beanspruchungen. Ein Bemessungsmodell entsteht aus der Kombination der entwickelten Interaktionsgleichungen mit bestehenden Ansätzen zur Berechnung der Tragfähigkeit in Richtung der Hauptachsen. Dieses Modell ermöglicht die realitätsnahe Bemessung von Ankerschienen unter ebenen und räumlichen Beanspruchungen.

Neben der Berechnung der Tragfähigkeiten ist für den Nachweis der Interaktion auch die Ermittlung der vorhandenen Beanspruchungen elementar. Während für Quer- und Zugbelastungen allgemein anerkannte Lastverteilungsmodelle existieren, ist über die Lastverteilung von Längsbelastungen bisher wenig bekannt. Um eine realitätsnahe Berechnung der Ankerkräfte auch für Belastungen in Längsrichtung zu ermöglichen, wird in dieser Arbeit ein Modell entwickelt. Dessen Verifikation erfolgt anhand experimenteller Untersuchungen, in denen erstmals Ankerkräfte im Versuch (indirekt) erfasst werden. Unterstützt durch numerische Untersuchungen wird ein Konzept entwickelt, um durch den Einsatz faseroptischer Messtechnik den axialen Kraftverlauf in der Ankerschiene zu ermitteln und daraus auf die Verteilung der Ankerkräfte zu schließen. Durch statistische Auswertungen der Versuchsergebnisse und Modellberechnungen erfolgt die Verifikation des Lastverteilungsmodells.

Abstract

Anchor channels are line-shaped fasteners consisting of a c-shaped steel profile with anchors attached to the back. They are used to transfer loads from attachments to concrete structures. For this purpose, bolts are inserted at arbitrary position along the channel axis. In addition to shear and tensile loads perpendicular to the channel, so-called toothed anchor channels can also transfer loads in the longitudinal direction of the channel. Plane or spatial loads result from these components at simultaneous action. Compared to axially separated loads, these can lead to interaction effects that influence the load-bearing behavior.

The load-bearing behavior of spatially loaded anchor channels with force components in the longitudinal direction has not been investigated in the literature so far and is therefore the focus of this work. This work proposes significant developments for the realistic description of interaction effects in concrete failure by developing interaction equations for a design model. The equations are based on the results of experimental investigations, for which a universal test rig is developed. Its basic idea is to apply the load with only one test cylinder and to adjust the load direction via horizontal and vertical rotations of specimen and test cylinder, respectively. The statistical evaluation of the test results by means of regression analyses leads to the determination of interaction equations for plane and spatial loads. A design model is then obtained by combining the developed interaction equations with existing approaches for calculating the bearing capacity in the direction of the main axes. This model enables the realistic design of anchor channels under plane and spatial loads.

In addition to the calculation of the load-bearing capacities, the determination of the actual forces is also elementary for the verification of the interaction. While generally accepted load distribution models exist for shear and tensile loads, there is still less information about the load distribution of longitudinal loads. In order to enable a realistic calculation of the anchor forces also for loads in the longitudinal direction, a model is developed in this work. This is verified by experimental investigations in which anchor forces are (indirectly) measured in tests for the first time. Supported by numerical investigations, a concept is developed to determine the axial force distribution in the anchor channel by using fiber-optic measurement technology and to infer the distribution of the anchor forces from measured data. Statistical evaluations of the test results and model calculations are used to verify the load distribution model.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2015 bis 2020 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Massivbau der Ruhr-Universität Bochum. Sie wurde von der dortigen Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften als Dissertation angenommen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark für die Möglichkeit, diese Arbeit an seinem Lehrstuhl zu verfassen sowie für seine kontinuierliche Förderung, Motivation und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Des Weiteren bedanke ich mich bei Frau apl. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele und Herrn Jun.-Prof. Dr. nat. techn. Dipl. Dipl.-Ing. Panagiotis Spyridis für die konstruktiven Gespräche und die Übernahme des zweiten und dritten Gutachtens. Vielen Dank auch an Herrn Prof. Dr.-Ing. Justin Geistefeldt für das Interesse an meiner Arbeit und den Vorsitz der Prüfungskommission.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen bedanke ich mich herzlich für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre am Lehrstuhl und deren freundschaftliche und hilfsbereite Unterstützung. Ganz besonders wird mir der intensive Austausch aller wissenschaftlichen Mitarbeiter am letzten Freitag im Monat in Erinnerung bleiben. Herrn Dr.-Ing. Mark Alexander Ahrens danke ich für die Durchsicht und wertvollen Hinweise bei sämtlichen Publikationen und Herrn Dr.-Ing. Markus Obel für die Unterstützung bei den Sensitivitätsanalysen. Des Weiteren danke ich Frau Gisela Wegener, die es als gute Seele des Lehrstuhls durch ihre Unterstützung ermöglicht hat, sich auf das wissenschaftliche Arbeiten konzentrieren zu können. Vielen Dank auch an Frau Sabine Weiß für die organisatorische Hilfe bei den finalen Schritten des Promotionsverfahrens.

Für die vielseitige Unterstützung danke ich meiner studentischen Hilfskraft Herrn Oleg Zoller, B. Sc., Herrn Felix Clauß, M. Sc. danke ich ebenso für seine Unterstützung zunächst als studentische Hilfskraft und anschließend für die freundschaftliche Bürogemeinschaft sowie viele intensive und hilfreiche Diskussionen. Ihm gilt zudem mein Dank für die sorgfältige Durchsicht des Manuskriptes.

Für die Unterstützung bei den experimentellen Arbeiten bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Hussein Alawieh, Herrn Dr.-Ing. Karsten Winkler und Herrn Dipl.-Ing. Dennis Witteck sowie den technischen Mitarbeitern der Werkstatt und der Versuchshalle der Konstruktionsteilprüfung KIBKON. Die vielfäl-

tige Mithilfe in Rat und Tat bei der Planung, Vorbereitung und Fertigung der Versuchsstände haben maßgeblich zum Gelingen der Versuchsserien beigetragen.

Für die Hilfe in allen fachlichen Fragen zur Befestigungstechnik und die konstruktive Zusammenarbeit allgemein sowie im Rahmen der gemeinsamen Veröffentlichungen möchte ich im Besonderen Herrn Dr.-Ing. Dirk Albartus, Herrn Dr.-Ing. Frank Häusler, Herrn Dr. sc. ETH Georg Kocur und Herrn Dr.-Ing. Christoph Mahrenholtz danken.

Den Unternehmen Halfen und Jordahl sei für die finanzielle Förderung der Arbeit gedankt.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner gesamten Familie, insbesondere meinen Eltern Loretta und Lothar, meiner Schwester Kim, meinem Bruder Artur sowie meinen Freunden für ihre Unterstützung, ihr Verständnis und den bedingungslosen Rückhalt in der gesamten Entstehungszeit dieser Arbeit. Ganz besonders gilt dieser Dank meiner wundervollen Frau Doreen und unserer Tochter Frida, die unser Leben seit der finalen Phase meiner Promotion bereichert.

Bochum, im Mai 2021

Dustin Konertz

Tag der Einreichung: 11. Januar 2021

Tag der mündlichen Prüfung: 03. Mai 2021

- | | |
|-----------------|---|
| 1. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. Peter Mark, Ruhr-Universität Bochum |
| 2. Gutachterin: | apl. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele, TU Kaiserslautern |
| 3. Gutachter: | Jun.-Prof. Dr. nat. techn. Dipl. Dipl.-Ing. Panagiotis Spyridis,
TU Dortmund |

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielstellung	1
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1	Allgemeines und Historie	5
2.2	Tragverhalten bei Zug-, Quer- und Längsbeanspruchungen	9
2.3	Tragverhalten bei räumlichen Beanspruchungen	13
2.4	Bemessung	15
2.4.1	Allgemeines und Historie	15
2.4.2	Bemessung nach Eurocode 2-4	16
3	Lastverteilung bei Ankerschienen	21
3.1	Lastverteilungsmodelle – Stand der Technik	21
3.1.1	Zugbelastungen	21
3.1.2	Querbelastungen	23
3.1.3	Längsbelastungen	24
3.2	Entwicklung eines Lastverteilungsmodells für Längsbelastungen	25
3.2.1	Einführung und Methodik	25
3.2.2	Gebettetes Balkenmodell	28
3.2.3	Faseroptische Messtechnik	29
3.2.4	Experimentelle Untersuchungen	35
3.2.5	Verifikation des Lastverteilungsmodells	47
4	Entwicklung eines universellen Versuchsstandes	49
4.1	Einführung und Grundidee	49
4.2	Randbedingungen und Anforderungskriterien	51
4.2.1	Materialien	51
4.2.2	Dimensionierung der Versuchskörper	52

4.3	Lasten und Dimensionierung der Hauptkomponenten	54
4.4	Komponenten, Details und Verbindungen	55
4.5	Validierung des Versuchsstandes	59
4.5.1	Durchführung von Tastversuchen	59
4.5.2	Schlussfolgerungen und Anpassungen	64
5	Experimentelle Untersuchung räumlicher Beanspruchungen	67
5.1	Vorgehen	67
5.2	Materialien	69
5.3	Versuchsprogramm	70
5.4	Versuchsergebnisse	71
5.4.1	Versagenstypen	71
5.4.2	Traglasten	73
5.4.3	Last-Verformungsverhalten	78
6	Entwicklung eines Bemessungsmodells	81
6.1	Ansatzfunktionen für Interaktionsgleichungen	81
6.2	Berechnungsmethode	83
6.3	Auswertung der Interaktionsversuche	84
6.3.1	Ebene Beanspruchungen	84
6.3.2	Räumliche Beanspruchungen	90
6.3.3	Diskussion der Ergebnisse	92
6.3.4	Sensitivitätsanalysen	93
6.4	Verifikation des Bemessungsmodells	97
6.4.1	Modifikation der Bemessungsgleichungen	97
6.4.2	Rechnerische Tragfähigkeiten bei Zugbeanspruchung	98
6.4.3	Rechnerische Tragfähigkeiten bei Querbeanspruchung	100
6.4.4	Rechnerische Tragfähigkeiten bei Längsbeanspruchung	102
6.4.5	Modellverifikation	104
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	111
	Literaturverzeichnis	I
A	Ergänzende Versuchsdaten	XV
A.1	Versuchsprogramm der Interaktionsversuche	XVI
A.2	Übersicht der Versuchsergebnisse	XVII
B	Technische Zeichnung der Lasteinleitungskonstruktion	XXXIII