

Ermüdungsverhalten von Beton unter Druckschwellbelastung

Dissertation
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der
Ruhr-Universität Bochum

von
Dipl.-Ing. Hurşit Ibuk

Bochum 2008

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

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

Heft 2010-3

Hurşit Ibuk

**Ermüdungsverhalten von Beton
unter Druckschwellbelastung**

Shaker Verlag
Aachen 2010

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., 2009

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9047-4

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

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2003 bis 2008 während meiner Mitarbeit am Lehrstuhl für Baustofftechnik sowie im Sonderforschungsbereich 398 „Lebensdauerorientierte Entwurfskonzepte“ an der Ruhr-Universität Bochum. Sie wurde von der dortigen Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften als Dissertation anerkannt. Für die finanzielle Unterstützung danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor R. Breitenbücher für die wissenschaftliche Betreuung und Förderung. Herrn Professor F. Stangenberg danke ich für sein Interesse an der vorliegenden Arbeit und die freundliche Übernahme des zweiten Gutachtens.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls sowie im Sonderforschungsbereich für die stets gute und konstruktive Zusammenarbeit. Besonderer Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. H. Alawieh für die äußerst wertvollen Ratschläge und Anregungen während der Durchführung dieser Arbeit.

Abschließend möchte ich meiner Familie für ihre Unterstützung danken, insbesondere meiner Frau Rabia, die mir in den letzten Jahren verständnisvoll und aufmunternd zur Seite stand.

Bochum, November 2008

Hurşit Ibuk

| | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Tag der Einreichung: | 28.11.2008 |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 13.03.2009 |
| 1. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. R. Breitenbücher |
| 2. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. F. Stangenberg |

Kurzfassung

Druckschwellbelastungen, die im Laufe der Nutzungsdauer auf ein Betontragwerk einwirken, können zu Veränderungen sowohl im Betongefüge als auch im lastabhängigen Betonverhalten führen. Detaillierte Kenntnisse über das Betonverhalten in diskreten Zwischenzuständen innerhalb der Nutzungsdauer können in die Lebensdauerplanung eines neu zu errichtenden Betontragwerks oder einer Umnutzung einbezogen werden. Für diese Betrachtungen stehen bisher keine aussagekräftigen Informationen über die allmählichen Veränderungen der maßgeblichen mechanischen Betoneigenschaften (Druckfestigkeit, statischer E-Modul) infolge der Druckschwellbelastung zur Verfügung. Jedoch sind diese hierfür von wesentlichem Interesse.

In der vorliegenden Arbeit wurden daher Druckschwellversuche an Betonprobekörpern durchgeführt. Die ggf. auftretenden Veränderungen in den maßgebenden mechanischen Betoneigenschaften wurden an unterschiedlichen Zwischenzuständen bestimmt.

In den umfangreichen Untersuchungen wurden unterschiedliche Betontypen (Normalbeton, Luftporenbeton, hochfester Beton) berücksichtigt. Hauptsächlich wurden einstufige Druckschwellbelastungen durchgeführt. Für diese Versuche wurde die untere Spannung auf 10 % der statischen Druckfestigkeit f_c (Kurzzeitfestigkeit) eingestellt, wohingegen drei unterschiedliche obere Spannungen ($0,60 f_c$; $0,675 f_c$ und $0,75 f_c$) berücksichtigt wurden.

Basierend auf den Versuchsergebnissen dieser Arbeit konnte festgestellt werden, dass eine durch die Druckschwellbelastung verursachte Mikrorissbildung die Spannungs-Dehnungslinie insbesondere durch einen Abfall des statischen E-Moduls verändert. Hingegen blieb die Druckfestigkeit nahezu unverändert. Zudem wurde nachgewiesen, dass der Abfall des statischen E-Moduls durch die Ermüdungsdehnung (Dehnungszunahme durch die Druckschwellbelastung) beschrieben werden kann. Der Zuwachs der Ermüdungsdehnung korrelierte näherungsweise linear mit dem Abfall des statischen E-Moduls. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass dieser Zusammenhang im untersuchten Belastungsbereich unabhängig von Belastungsparametern (Spannungsniveau, Lastzyklenzahl) gilt. Abschließend mündeten diese Erkenntnisse in eine analytische Beschreibung des Vorbruchbereichs der Spannungs-Dehnungslinie von druckschwellbelastetem Beton. Erstmals wurde dabei der Schädigungszustand mit einem dehnungsabhängigen Ansatz beschrieben.

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG..... | 1 |
| 2 | VERHALTEN VON BETON UNTER DRUCKBELASTUNG..... | 3 |
| 2.1 | FORMÄNDERUNG VON BETON..... | 3 |
| 2.2 | BETON UNTER STATISCHER DRUCKBELASTUNG..... | 3 |
| 2.3 | KRIECHEN VON BETON | 10 |
| 2.4 | BETON UNTER DRUCKSCHWELLBELASTUNG..... | 12 |
| 2.4.1 | <i>Ermüdung von Beton</i> | <i>12</i> |
| 2.4.2 | <i>Wöhlerlinie.....</i> | <i>13</i> |
| 2.4.3 | <i>Dehnungsverlauf infolge Druckschwellbelastung</i> | <i>19</i> |
| 2.4.4 | <i>Veränderung der Spannungs-Dehnungslinie.....</i> | <i>21</i> |
| 2.4.5 | <i>Auswirkungen auf den E-Modul</i> | <i>23</i> |
| 2.4.6 | <i>Auswirkungen auf die Druckfestigkeit</i> | <i>25</i> |
| 2.5 | WEITERE ERMÜDUNGSRELEVANTE BELASTUNGEN..... | 27 |
| 2.6 | SCHADENSAKKUMULATIONSHYPOTHESEN..... | 29 |
| 3 | EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN | 32 |
| 3.1 | VERSUCHSKONZEPT..... | 32 |
| 3.2 | VERSUCHSPROGRAMM..... | 33 |
| 3.3 | BELASTUNGSEINRICHTUNG UND PROBEKÖRPER | 35 |
| 3.4 | UNTERSUCHUNGSMETHODEN | 36 |
| 4 | VERSUCHSERGEBNISSE | 40 |
| 4.1 | ZUNAHME DER LÄNGSDEHNUNGEN | 40 |
| 4.2 | VERÄNDERUNGEN IN DER SPANNUNGS-DEHNUNGSLINIE | 43 |
| 4.3 | VERÄNDERUNGEN IM E-MODUL | 45 |
| 4.4 | BESTIMMUNG DER ERMÜDUNGSDEHNUNG VON BETON..... | 50 |
| 4.5 | DAUERSTAND- UND DRUCKSCHWELLBELASTUNGEN IM VERGLEICH..... | 52 |
| 5 | AUSWERTUNGEN AUF BASIS DER ERMÜDUNGSDEHNUNG..... | 54 |
| 5.1 | KORRELATION ZWISCHEN $\epsilon_{\text{FAT,MAX}}$ UND E_{STAT} FÜR UNTERSCHIEDLICHE S_{MAX} | 54 |
| 5.2 | EINFLUSS DER MATRIX AUF DAS VERHÄLTNISS ZWISCHEN $\epsilon_{\text{FAT,MAX}}$ UND E_{STAT} | 55 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5.3 | EINFLUSS DER GESTEINSKÖRNUNG AUF DAS VERHÄLTNISS ZWISCHEN $\epsilon_{FAT,MAX}$ UND E_{STAT} | 56 |
| 5.4 | ZWEISTUFIGE LASTSZENARIOS UND REIHENFOLGEEFFEKT | 57 |
| 5.5 | VERÄNDERUNGEN DER ZUR DRUCKFESTIGKEIT KORRESPONDIERENDEN DEHNUNG ϵ_U | 57 |
| 5.6 | DRUCKSCHWELLBELASTUNGEN IM DAUERSCHWINGFESTIGKEITSBEREICH | 58 |
| 5.7 | STREUUNGEN VON $\epsilon_{FAT,BRUCH}$ UND N_F IM VERGLEICH | 61 |
| 6 | SPANNUNGS-DEHNUNGSLINIE DRUCKSCHWELLBELASTETER BETONE | 62 |
| 6.1 | SPANNUNGS-DEHNUNGSLINIE VON BETON NACH MODEL CODE 1990..... | 62 |
| 6.2 | SPANNUNGS-DEHNUNGSLINIE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER ERMÜDUNG .. | 63 |
| 6.2.1 | <i>Dehnungsabhängige Formulierung der Schädigung</i> | 63 |
| 6.2.2 | <i>Bezogener statische E-Modul E_{stat} in Abhängigkeit von $\epsilon_{fat,max}$.....</i> | 64 |
| 6.2.3 | <i>Beschreibung der Spannungs-Dehnungslinie</i> | 65 |
| 6.2.4 | <i>Parameter η</i> | 68 |
| 6.3 | ERLÄUTERUNG ZU DEN VARIABLEN | 69 |
| 7 | ZUSAMMENFASSUNG | 70 |
| 8 | LITERATURVERZEICHNIS | 72 |
| 9 | ANHANG A | 79 |
| 10 | ANHANG B | 94 |