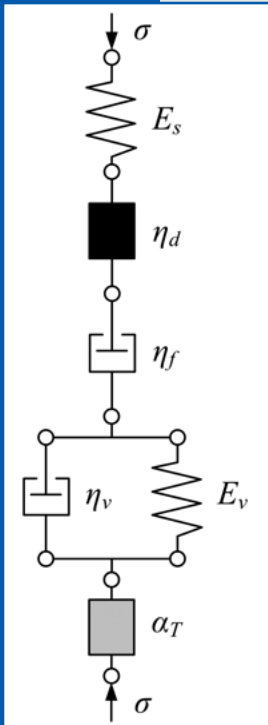




Berichte des Instituts für Massivbau

Christoph von der Haar

Ein mechanisch basiertes Dehnungsmodell für ermüdungsbeanspruchten Beton



Berichte

des Instituts für Massivbau der Leibniz Universität Hannover
Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Leibniz Universität Hannover – Institut für Massivbau
Heft 11, März 2017

Fraunhofer IRB Verlag

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Leibniz Universität Hannover
Institut für Massivbau
Appelstraße 9 A
30167 Hannover

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede
Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der
vorherigen schriftlichen Einwilligung des Herausgebers.

© 2017 by Univ.-Prof. Steffen Marx
Leibniz Universität Hannover
Institut für Massivbau
ISBN (Print): 978-3-8167-9734-0
ISBN (E-Book): 978-3-8167-9765-4

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 60, 70504 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail irb@irb.fraunhofer.de
URL <http://www.baufachinformation.de>

Ein mechanisch basiertes Dehnungsmodell für ermüdungsbeanspruchten Beton

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von
Dipl.-Ing. Christoph von der Haar

2016

Referent: Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Korreferenten: Prof. Dr. phil. Dr. techn. Konrad Bergmeister

Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus

Tag der Promotion: 22.9.2016

Kurzfassung

Beton weist unter zyklischen Lasten ein komplexes Verformungsverhalten auf. Dieses beeinflusst die Spannungsverteilung auf der Querschnittsebene und vermag sich positiv auf die Lebensdauer von Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen auszuwirken. Das normative Ermüdungsnachweiskonzept prognostiziert die Lebensdauer von Betonbauteilen allein auf der Grundlage von Wöhlerlinien. Die Verformungsentwicklung des Betons und die Spannungsumlagerungen auf der Querschnittsebene finden keine Berücksichtigung. Die auftretenden Verformungsprozesse und -mechanismen sind allerdings bis heute auch nicht abschließend geklärt, sodass zurzeit keine Weiterentwicklung des Ermüdungsnachweiskonzeptes möglich ist.

In dieser Arbeit wird das Verformungsverhalten von ermüdungsbeanspruchtem Beton auf der Grundlage eines additiven Dehnungsmodells betrachtet. In dem Modell wird von der Hypothese ausgegangen, dass unter einer Ermüdungsbeanspruchung elastische, viskose, thermische und schädigungsinduzierte Dehnungen im Beton auftreten. Die einzelnen Dehnungsanteile entwickeln sich individuell in Abhängigkeit von der Zahl der Lastwechsel, der Versuchsdauer und den zyklischen Beanspruchungsparametern. Kernstück der Arbeit ist die Bestimmung eines kriechaffinen Beanspruchungsniveaus, um den viskosen Verformungsanteil in Abhängigkeit von der Ermüdungsbeanspruchung abschätzen zu können. Als kriechaffines Beanspruchungsniveau wird dasjenige Spannungsniveau bezeichnet, welches unter einer konstanten Druckbeanspruchung die gleichen viskosen Verformungen hervorruft wie unter der Ermüdungsbeanspruchung bei gleicher Beanspruchungsdauer. Das kriechaffine Beanspruchungsniveau wird auf der Grundlage einer rheologischen Modellvorstellung und für verschiedene Kriechtheorien abgeleitet und für unterschiedliche Mittelspannungen, Spannungsamplituden und Belastungsfrequenzen bestimmt.

Auf der Grundlage des kriechaffinen Beanspruchungsniveaus und bekannter Zusammenhänge für die elastischen und thermischen Dehnungen können drei der vier Dehnungsanteile des additiven Dehnungsmodells beschrieben werden, sodass letztlich auch der schädigungsinduzierte Dehnungsanteil identifizierbar wird. Die gemessenen Dehnungen ermüdungsbeanspruchter Betonproben werden entsprechend der additiven Modellvorstellung zerlegt und analysiert. Es zeigt sich, dass sich der schädigungsinduzierte Dehnungsanteil in Abhängigkeit der logarithmierten Bruchlastwechselzahl linear entwickelt. Dementsprechend spiegelt sich der lineare Zusammenhang zwischen dem Oberspannungsniveau und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl, wie er in den Wöhlerlinien für Beton sichtbar ist, auch im Dehnungsverhalten des Betons wider. Andererseits nehmen die Bruchdehnungen ermüdungsbeanspruchter Betonproben einen konstanten Wert an, wenn die gemessenen Verformungen um die thermischen und viskosen Dehnungsanteile korrigiert werden.

Schlagwörter: Beton, Ermüdungsbeanspruchung, Dehnungsentwicklung, additives Dehnungsmodell, kriechaffines Spannungsniveau

Abstract

Concrete exhibits complex deformation behaviour under cyclic loads. This results in considerable stress redistributions in the cross-sections, which could have a positive effect on the service life of concrete constructions. The normative fatigue design concept predicts the service life based on $S-N$ curves only; cross-sectional deformations and stress redistributions are neglected. However, the occurring deformation processes and mechanisms are not yet fully understood, which makes it very difficult to develop the existing fatigue design concept further.

In this dissertation, the deformation behaviour of concrete is considered according to an additive strain model. The model assumes that under cyclic loads elastic, viscous, thermal, and damage-induced strains occur in concrete. The strain components develop independently of each other as a function of the number of load cycles, the test duration, and stress level. This dissertation focuses on the determination of a creep-relevant stress level to estimate the viscous deformation component. The creep-relevant stress level is the stress level which causes the same viscous deformations under constant loads as under cyclic loads for the same test duration. The creep-relevant stress level is derived from a rheological model and for different creep theories and is determined for different stress levels and load frequencies.

Based on the creep-relevant stress levels and known relationships for elastic and thermal strains, three of the four strain components of the additive strain model can be described. Thus, the damage-induced strain component can also be identified. Experimentally measured fatigue strains of concrete specimens are separated into the strain components assumed by the additive strain model. The components are evaluated and analysed individually. It was found that the damage-induced strain component develops linearly as a function of the logarithmic load cycles to failure in the examined cycle range. Accordingly, the linear relationship between the maximum compressive stress level and the logarithmic load cycles to failure is reflected in the strain behaviour, which is visible in the $S-N$ curves for concrete. On the other hand, the ultimate fatigue strain seems to be constant if the measured deformations are corrected by the thermal and viscous strains.

Keywords: concrete, fatigue loading, strain development, additive strain model, creep-relevant load level

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Leibniz Universität Hannover.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx, für die Anregungen und die wissenschaftliche Begleitung meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr. phil. Dr. techn. Konrad Bergmeister und Herrn Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus danke ich für das entgegengebrachte wissenschaftliche Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme der Korreferate. Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Des Weiteren möchte ich mich bei all meinen Kollegen und wissenschaftlichen Hilfskräften herzlich bedanken die mir stets mit Rat und Tat geholfen haben, diese Arbeit zu vollenden.

Mein größter Dank gilt meiner Familie und meiner Frau Miriam für die jahrelange Unterstützung und das entgegengebrachte Verständnis.

Christoph von der Haar

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract	III
Vorwort	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	X
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung und Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Gliederung der Arbeit	4
2 Stand der Forschung	7
2.1 Materialverhalten unter monoton steigender Beanspruchung.....	7
2.2 Materialverhalten unter Dauerbeanspruchung	10
2.2.1 Phänomenologisches Materialverhalten.....	10
2.2.2 Empirische Kriechfunktionen.....	13
2.2.3 Rheologische Kriechansätze.....	15
2.2.4 Kriechmodelle	17
2.3 Materialverhalten unter zyklischer, verformungsgeregelter Beanspruchung	23
2.4 Materialverhalten unter zyklischer, kraftgeregelter Beanspruchung	25
2.4.1 Allgemeines und Grundlagen.....	25
2.4.2 Phänomenologisches Materialverhalten.....	27
2.5 Energetische Betrachtung der Schädigungsprozesse im Beton.....	37
2.6 Dehnungsmodelle für ermüdungsbeanspruchten Beton.....	39
2.6.1 Modelle basierend auf dem <i>Envelope</i> -Konzept.....	39

2.6.2	Energetisches Ermüdungsschädigungsmodell.....	40
3	Hypothese und Vorgehen.....	43
3.1	Einordnung der Arbeit in den Kontext der Literaturstudie.....	43
3.2	Hypothese.....	44
3.3	Ziel und Vorgehen.....	48
3.3.1	Modellentwicklung.....	49
3.3.2	Experimentelle Verifikation.....	50
4	Modellbildung und Ableitung kriechaffiner Beanspruchungsniveaus.....	53
4.1	Allgemeines.....	53
4.2	Mathematische Modellentwicklung.....	56
4.2.1	Reversibles Modell.....	56
4.2.2	Irreversibles Modell.....	58
4.3	Kriechkurven und Modellparameter.....	60
4.4	Modellverhalten unter variabler Beanspruchung.....	62
4.5	Sinusförmiger Beanspruchungsverlauf.....	69
4.6	Fazit.....	73
5	Experimentelle Untersuchungen.....	75
5.1	Versuchsdurchführung.....	75
5.1.1	Betoneigenschaften und Probekörperherstellung.....	75
5.1.2	Ermüdungsversuche.....	76
5.1.3	Kriechversuche.....	78
5.2	Darstellung der Versuchsergebnisse.....	79
5.2.1	Zylinderdruckfestigkeit.....	79
5.2.2	Bruchlastwechselzahlen.....	80
5.2.3	Temperaturentwicklung.....	82
5.2.4	Steifigkeitsentwicklung.....	83

5.2.5	Dehnungsverhalten.....	86
5.2.6	Viskoses Verformungsverhalten	90
6	Auswertung der Dehnungsanteile.....	93
6.1	Elastischer Dehnungsanteil	93
6.2	Thermischer Dehnungsanteil	95
6.3	Viskoser Dehnungsanteil	99
6.4	Schädigungsinduzierter Dehnungsanteil.....	102
6.5	Dehnungsentwicklung.....	104
6.6	Fazit.....	106
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	109
7.1	Zusammenfassung.....	109
7.2	Ausblick	111
	Literaturverzeichnis.....	113
	Abbildungsverzeichnis.....	120
	Tabellenverzeichnis.....	124
	Anhang	125

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Griechische Buchstaben

ε	Dehnung / Stauchung
ε_c	Betondehnung bei Erreichen der Betondruckfestigkeit f_c bei monoton steigender Beanspruchung
ε_{cr}	Viskose Dehnung des Betons
ε_d	Schädigungsinduzierte Dehnung des Betons im Ermüdungsversuch
ε_{el}	Elastische Dehnung des Betons
ε_f	Irreversible Fließdehnung des Betons
ε_{fat}	Messbare Dehnung des Betons im Ermüdungsversuch
ε_o	Dehnungsverlauf auf dem Oberspannungsniveau des Ermüdungsversuchs
ε_t	Temperaturdehnung
ε_u	Dehnungsverlauf auf dem Unterspannungsniveau des Ermüdungsversuchs
ε_v	Verzögert-elastische Dehnung des Betons
ε_o^{II}	Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase auf dem Oberspannungsniveau des Ermüdungsversuchs
ε_u^{II}	Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase auf dem Unterspannungsniveau des Ermüdungsversuchs
ε^F	Dehnung zum Zeitpunkt des Probekörperversagens im Ermüdungsversuch
$\eta, \eta_d, \eta_v, \eta_f$	Dämpfersteifigkeiten
ν_c	Querdehnungsverhältnis des Betons
σ	Spannung
σ_a	Spannungsamplitude im Ermüdungsversuch
σ_{cr}	Spannung im Kriechversuch
σ_m	Mittelwert der Spannungen im Ermüdungsversuch
σ_o	Betragsmäßig größter Wert der Spannungen im Ermüdungsversuch
σ_u	Betragsmäßig kleinster Wert der Spannungen im Ermüdungsversuch
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite im Ermüdungsversuch
φ	Kriechzahl
φ_∞	Endkriechzahl
ψ	Phasenwinkel der zyklischen Beanspruchung

Große lateinische Buchstaben

C	Konstante
E	Elastizitätsmodul / Federsteifigkeit
E_c	Elastizitätsmodul des Betons

E_s	Elastizitätsmodul ermittelt als Sekantenmodul für den Entlastungsast bei zyklischer Beanspruchung
J	Kriech- oder Komplianzfunktion
N	Anzahl aufgebracht Lastwechsel
N_f	Ertragbare Lastwechselzahl bis zum Bruch des Probekörpers (Bruchlastwechselzahl)
P	Versagenswahrscheinlichkeit
R	Verhältniswert aus Ober- und Unterspannung im Ermüdungsversuch
R^2	Bestimmtheitsmaß
σ_{cr}	Auf die Betondruckfestigkeit f_c bezogenes kriecheaffines Spannungsniveau σ_{cr} im Ermüdungsversuch
σ_m	Auf die Betondruckfestigkeit f_c bezogene Mittelspannung σ_m im Ermüdungsversuch
σ_o	Auf die Betondruckfestigkeit f_c bezogene Oberspannung σ_o im Ermüdungsversuch
σ_u	Auf die Betondruckfestigkeit f_c bezogene Unterspannung σ_u im Ermüdungsversuch
ΔS	Auf die Betondruckfestigkeit f_c bezogene Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ im Ermüdungsversuch
T	Temperatur
ΔT	Temperaturänderung

Kleine lateinische Buchstaben

a, b, m, n	Konstanten
f_c	Einaxiale Druckfestigkeit des Betons
$f_{c,cube,28d}$	Einaxiale Würfeldruckfestigkeit des Betons im Alter von 28 Tagen
$f_{c,cyl,28d}$	Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit des Betons im Alter von 28 Tagen
f_p	Belastungsfrequenz im Ermüdungsversuch
s	Standardabweichung einer Stichprobe
t	Zeit
t_0	Betonalter bei Belastungsbeginn

Abkürzungen

BLZ	Bruchlastwechselzahl
LW	Lastwechsel
w/z-Wert	Wasser-Zementwert

