

Berichte aus dem Institut für Baustoffe

Nadja Oneschkow

**Analyse des
Ermüdungsverhaltens
von Beton anhand der
Dehnungsentwicklung**



Analyse des Ermüdungsverhaltens von Beton anhand der Dehnungsentwicklung

von

Dr.-Ing. Nadja Oneschkow

Zweite, für die elektronische Veröffentlichung
leicht überarbeitete Fassung

Hannover 2016



CC by 3.0 Germany <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de/deed.en>

Analyse des Ermüdungsverhaltens von Beton anhand der Dehnungsentwicklung

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

zur

Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieurin
(Dr.-Ing.)

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Nadja Oneschkow

Hannover 2014

Referent: Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus (Leibniz Universität Hannover)
Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx (Leibniz Universität Hannover)
Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders (Bergische Universität Wuppertal)
Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann (Leibniz Universität Hannover)
Tag der Prüfung: 21.02.2014

Impressum

Autor: Dipl.-Ing. Nadja Oneschkow
Titel: Analyse des Ermüdungsverhaltens von Beton anhand der
Dehnungsentwicklung
Schriftenreihe: Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 13
Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus
Institut für Baustoffe
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 9A
30167 Hannover
Tel.: 0511 / 762-3722
Fax: 0511 / 762-4736
<http://www.baustoff.uni-hannover.de>
ISBN 978-3-936634-14-3

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Baustoffe der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Erste Ideen zu dieser Arbeit entstanden bereits während meiner vorangegangenen Tätigkeit am Institut für Massivbau von Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grünberg.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus, für die wissenschaftliche Betreuung und die Erstberichterstattung. Insbesondere das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir eingeräumten Handlungs- und Entscheidungsfreiräume haben dazu beigetragen, dass ich sehr viel Freude an der wissenschaftlichen Arbeit am Institut für Baustoffe hatte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx und Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders danke ich für die interessanten Diskussionen und die Übernahme der Korreferate. Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission und das stete Interesse an meiner Promotionsarbeit.

Meine wissenschaftliche Arbeit wurde zu einem erheblichen Teil durch ein Stipendium im Rahmen des Caroline Herschel Programms des Gleichstellungsbüros der Leibniz Universität Hannover ermöglicht. Ich möchte mich für die finanzielle Unterstützung, aber auch für die darüber hinausgehende Unterstützung, beim Gleichstellungsbüro und insbesondere bei der Gleichstellungsbeauftragten Frau Dipl.-Sozialwiss. Helga Gotzmann bedanken.

Den Kollegen und Kolleginnen am Institut für Baustoffe danke ich für die hervorragende und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Besonders möchte ich mich bei Kerstin Elsmeier und Julian Hümme bedanken, die mir viele Aufgaben aus dem Institutsalltag abgenommen haben, damit ich diese Arbeit fertigstellen konnte. Des Weiteren bedanke ich mich bei den Laborantinnen und Laboranten. Ohne ihre Unterstützung wäre die Durchführung der vielen experimentellen Untersuchungen nicht möglich gewesen. Mein spezieller Dank geht an Olaf Menze und Andrea Hildebrand, die mich über die Jahre tatkräftig unterstützt haben.

Freunden, Kollegen und Verwandten danke ich für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Mein größter Dank gilt meiner Familie und meinem Freund für die jahrelange Unterstützung und das mir entgegengebrachte Verständnis.

Nadja Oneschkow

Kurzfassung

Die Weiterentwicklungen in der Betontechnologie führten in den letzten Jahrzehnten zu Hochleistungsbetonen mit immer höheren Festigkeiten. Der Ermüdungsnachweis wurde jedoch kaum weiterentwickelt und beinhaltet immer noch sehr grobe Herangehensweisen bei der Berücksichtigung des Materialwiderstands von Beton. Für eine grundlegende Weiterentwicklung dieses Nachweises fehlt noch das notwendige Wissen zu den Mechanismen der Betonermüdung.

Das Ziel dieser Arbeit war es daher, grundlegende Erkenntnisse zum Ermüdungsverhalten hochfester Betone bei unterschiedlichen zyklischen Beanspruchungen zu ermitteln und hierdurch zu einem besseren Verständnis der Mechanismen der Betonermüdung beizutragen. In der vorliegenden Arbeit wurde das Ermüdungsverhalten eines hochfesten Betons bei Druckschwellbeanspruchung anhand der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen untersucht. Betrachtet wurden dabei die Einflüsse der bezogenen Oberspannung, der Belastungsfrequenz und der Wellenform. Zusätzlich wurden, ausgehend von in der Literatur dokumentierten Ansätzen, Versuche bei monoton steigender Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung vergleichend durchgeführt.

Die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen werden durch die untersuchten Belastungsparameter der Ermüdungsbeanspruchung eindeutig beeinflusst. Charakteristische Zusammenhänge zwischen der Beeinflussung einzelner Kenngrößen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung und der Beeinflussung der Bruchlastwechselzahlen wurden aufgezeigt. Anhand der Dehnungen und Steifigkeiten an den Phasenübergängen konnten Hinweise auf beanspruchungsartabhängige Gefügestände abgeleitet werden. Die vergleichende Auswertung des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender Beanspruchung, Ermüdungsbeanspruchung und Dauerstandbeanspruchung zeigte, dass das Ermüdungsverhalten von Beton nicht adäquat in Anlehnung an andere Beanspruchungsarten beschrieben werden kann. Die Untersuchungsergebnisse wurden in eine Modellvorstellung übertragen, die zur Beurteilung der baustofflichen Phänomene bei zyklischen Beanspruchungen geeignet ist. Dabei wurde die Hypothese aufgestellt, dass sich unterschiedlich ausgeprägte Kleinst-Gefügeveränderungen beanspruchungsabhängig einstellen, die die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen beeinflussen.

Die detaillierte Untersuchung der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen führte zu neuen und tiefgehenden Erkenntnissen und sollte ergänzt durch die Betrachtungen von Gefügeständen zukünftig weiterverfolgt werden.

Stichworte:

Ermüdung, hochfester Beton, HPC, Druckschwellbeanspruchung, Dehnungsentwicklung, Steifigkeitsentwicklung

Abstract

The developments in concrete technology in recent decades have led to high-performance concretes with ever increasing strength. However, the fatigue design aspects over the same period have hardly been developed and still involve very rough estimations in their consideration of the resistance of concrete. The fundamental lack of understanding of the mechanisms of concrete fatigue is the main inhibiting factor in further advancing fatigue design.

This paper, therefore, aims at gaining fundamental knowledge concerning the fatigue behaviour of high-performance concretes subjected to various fatigue loadings, thereby contributing to the general understanding of their fatigue mechanisms. To do this, the behaviour of a high-performance concrete under pure compressive fatigue loading was examined at a fundamental level on the basis of the development of strain and stiffness. The investigation involved the analysis of three influences on the fatigue behaviour of concrete – the maximum stress level, the loading frequency and the waveform. In addition, tests with monotonically increasing loads and with sustained loads were performed in a comparative manner following approaches documented in the literature.

The development of strain and stiffness are measurably affected by the load parameters studied. Characteristic relationships between the influence on the individual parameters of developments of strain and stiffness and on changes in the numbers of cycles to failure were developed. Indications of load type-dependent states of the material could be derived on the basis of different strain fractions of the total strain at the transition of stages. A comparative evaluation of the strain development in static short-term loading, fatigue loading and static long-term loading showed that the fatigue behaviour of concrete cannot be adequately described based on the strain behaviour of these other two types of loading. The findings of the investigations were transferred to a model concept which is applicable to the assessment of material-specific phenomena related to fatigue loading and other types of loading. This enabled the derivation of a hypothesis that tiny structural changes, which are variously pronounced depending on the type of loading, affect the formation and expansion of microcracks as ambient conditions.

The detailed investigation of concrete fatigue on the basis of the developments of strain and stiffness led to new and deeper knowledge and should be further pursued in future research in the subject area by additionally investigating different states of microstructure.

Keywords:

Fatigue, high-performance concrete, HPC, pure compressive cyclic loading, development of strain, development of stiffness

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Inhaltsverzeichnis	V
Definitionen, Begrifflichkeiten	X
Formelzeichen	XII
Kapitel 1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Gliederung der Arbeit	5
Kapitel 2 Materialverhalten von Beton	7
2.1 Monoton steigende Druckbeanspruchung	7
2.1.1 Spannungs-Dehnungslinie	7
2.1.2 Einfluss der Betondruckfestigkeit	10
2.1.3 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit	13
2.1.4 Zusammenfassung und Beurteilung	19
2.2 Druckschwellbeanspruchung	20
2.2.1 Grundlagen	20
2.2.2 Normung im Bereich Betonermüdung	29
2.2.3 Einfluss der bezogenen Oberspannung	34
2.2.4 Einfluss der Betondruckfestigkeit	37
2.2.5 Einfluss der Belastungsfrequenz	39
2.2.6 Einfluss der Wellenform	42
2.2.7 Zusammenfassung und Beurteilung	43
2.3 Dauerstandbeanspruchung (Druck)	46
2.3.1 Grundlagen	46
2.3.2 Einfluss des Beanspruchungsniveaus	48
2.3.3 Einfluss der Betondruckfestigkeit	49
2.3.4 Zusammenhang zwischen dem Materialverhalten bei Dauerstandbeanspruchung und monoton steigender Beanspruchung	50
2.3.5 Zusammenfassung und Beurteilung	50
2.4 Vergleich des Materialverhaltens von Beton bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten	51
2.4.1 Materialverhalten bei zyklischer Beanspruchung und monoton steigender Beanspruchung	51
2.4.2 Materialverhalten bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung	56

2.4.3	Zusammenfassung und Beurteilung	58
Kapitel 3	Arbeitsbereiche und Ableitung konkreter Fragestellungen	60
3.1	Festlegung der Arbeitsbereiche	60
3.2	Untersuchung des Dehnungs- und Steifigkeitsverhaltens von Beton bei Ermüdungsbeanspruchung	61
3.3	Untersuchung möglicher Zusammenhänge des Dehnungsverhaltens von Beton bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten	62
3.4	Beurteilung von Hypothesen zum Ermüdungsverhalten von Beton	64
Kapitel 4	Experimentelle Untersuchungen	65
4.1	Konzeptionelle Überlegungen	65
4.2	Untersuchter Beton und Probekörperherstellung	66
4.3	Genutzte Prüfmaschinen	68
4.4	Versuchsprogramm	69
4.4.1	Versuche mit monoton steigender Beanspruchung und unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten	69
4.4.2	Ermüdungsversuche	71
4.4.3	Dauerstandversuche bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten	77
4.5	Versuchsaufbau und Messtechnik	78
4.6	Messdatenauswertung und -aufbereitung	80
4.6.1	Bruchlastwechselzahlen	80
4.6.2	Dehnungen und Dehnungsentwicklungen	80
4.6.3	Statistische Methoden	81
Kapitel 5	Versuche mit monoton steigender Beanspruchung	84
5.1	Einordnung	84
5.2	Überblick über die untersuchten Beanspruchungsgeschwindigkeiten	85
5.3	Beeinflussung der Spannungs-Dehnungslinie	86
5.4	Charakteristik der Druckfestigkeitssteigerung	89
5.5	Vergleich der Druckfestigkeitssteigerung mit Regelwerken	92
5.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	93
Kapitel 6	Ermüdungsversuche	94
6.1	Überblick	94
6.2	Untersuchte Einflüsse und ihre Wechselwirkungen	95
6.3	Genauigkeit der Prüfmaschinenregelung	100
6.4	Bruchlastwechselzahlen	101
6.4.1	Einordnung	101
6.4.2	Einfluss der bezogenen Oberspannung	101
6.4.3	Einfluss der Belastungsfrequenz	104

6.4.4	Einfluss der Wellenform	110
6.4.5	Vergleich der Bruchlastwechselzahlen des hochfesten Betons mit ausgewählten Regelwerken	112
6.4.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	113
6.5	Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen	115
6.5.1	Einordnung	115
6.5.2	Auswertungskonzept	116
6.5.3	Verlauf der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen	120
6.5.4	Kenngrößen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung	122
6.5.5	Einfluss der bezogenen Oberspannung	128
6.5.6	Einfluss der Belastungsfrequenz	133
6.5.7	Einfluss der Wellenform	141
6.5.8	Systematische Zusammenhänge	145
6.5.9	Zusammenfassung der Ergebnisse	162
Kapitel 7	Dauerstandversuche	165
7.1	Einordnung	165
7.2	Kenngrößen der Dehnungsentwicklungen	166
7.3	Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei $S_D = 0,90$ und $S_D = 0,80$	167
7.4	Detaillierte Betrachtung der Dehnungsentwicklungen bei $S_D = 0,90$	170
7.5	Einfluss verschiedener Belastungsgeschwindigkeiten	171
7.6	Resttragverhalten	174
7.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	176
Kapitel 8	Kombinierte Auswertung des Materialverhaltens bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten	178
8.1	Überblick	178
8.2	Vergleich der zyklischen Dehnungsentwicklungen mit den Spannungs- Dehnungslinien infolge monoton steigender Beanspruchung	179
8.2.1	Einordnung	179
8.2.2	Vorbemerkungen zum Vergleich des Dehnungsverhaltens	180
8.2.3	Vergleich der Dehnungsverläufe	180
8.2.4	Betrachtung der Bruchdehnungen	185
8.2.5	Zusammenfassung und Beurteilung	187
8.3	Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung	188
8.3.1	Einordnung	188
8.3.2	Vorbemerkungen zum Vergleich der Dehnungsentwicklungen	189
8.3.3	Kenngrößen der Dehnungsentwicklungen	190
8.3.4	Verlauf der Dehnungsentwicklungen	191
8.3.5	Systematische Zusammenhänge	198

8.3.6	Zusammenfassung und Beurteilung	200
8.4	Approximation des Frequenzeinflusses durch die Berücksichtigung der Druckfestigkeitssteigerung	201
8.4.1	Einordnung	201
8.4.2	Umgerechnete bezogene Beanspruchungsniveaus	202
8.4.3	Ermüdungsversuche mit dreiecksförmiger Beanspruchung	203
8.4.4	Ermüdungsversuche mit sinusförmiger Beanspruchung	204
8.4.5	Zusammenfassung und Beurteilung	209
8.5	Zusammenhang zwischen der zyklischen Beanspruchung und der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase	210
8.5.1	Einordnung	210
8.5.2	Ableitung des Zusammenhangs	211
8.5.3	Zusammenfassung und Beurteilung	213
Kapitel 9	Beurteilung von Hypothesen zum Ermüdungsverhalten von Betonen	215
9.1	Vorüberlegungen zu den Hypothesen	215
9.2	Zeitliche und zyklische Effekte	217
9.3	Belastungsgeschwindigkeit	218
9.4	„Schädigungshypothese“ nach <i>Pfanner</i>	220
9.5	Zusammenfassung	221
Kapitel 10	Übertragung der Untersuchungsergebnisse in eine Modellvorstellung	223
10.1	Überblick	223
10.2	Beschreibung der Dehnungsanteile im Lastwechsel	223
10.3	Beschreibung der Dehnungsanteile im Ermüdungsprozess	226
10.4	Übertragung und Anwendung der Modellvorstellung auf die Ermüdungsversuche	228
10.4.1	Eingrenzung der verwendeten Versuchsergebnisse	228
10.4.2	Zeitliche und zyklische Effekte	228
10.4.3	Einfluss der bezogenen Oberspannung	229
10.4.4	Einfluss der Belastungsfrequenz	232
10.5	Übertragung der Modellvorstellung auf den Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung	238
10.6	Ableitung einer Hypothese zu Gefügeständen	240
10.7	Zusammenfassung und Beurteilung	242
Kapitel 11	Zusammenfassung und Ausblick	244
11.1	Zusammenfassung	244
11.2	Ausblick	248
Literatur		250

Abbildungsverzeichnis	259
Tabellenverzeichnis	264
Anhang	

Definitionen, Begrifflichkeiten

Beanspruchungsniveau:	Beanspruchung bezogen auf die Druckfestigkeit.
Beanspruchungsdauer:	
Zyklische Beanspruchung:	Dauer der zyklischen Beanspruchung ab dem Beginn der zyklischen Belastung.
Dauerstandbeanspruchung:	Dauer der konstanten Dauerstandbeanspruchung.
Belastungsparameter:	Sämtliche Parameter, die erforderlich sind, um die Belastung im Versuch zu beschreiben.
Monoton steig. Belastung:	Beanspruchungsart (Druck / Zug), Belastungsgeschwindigkeit, Art der Regelung
Zyklische Belastung:	Belastung, Prüffrequenz, Form der Last-Zeit-Funktion
Dauerstandbelastung:	Belastung, Laststeigerungsgeschwindigkeit
Bruchlastwechselzahl:	Lastwechselzahl, bei der unter Ermüdungsbeanspruchung das Versagen eintritt. Sie wird häufig als logarithmierter Wert angegeben ($\log N_f$). Hierbei ist der dekadische Logarithmus gemeint.
Dehnungsniveau:	„Höhenlage“ der Dehnungsentwicklung.
Dreiecksversuch:	Kurz für: Zyklischer Versuch mit dreiecksförmiger Last-Zeit-Funktion.
Ermüdungsbeanspruchung:	Wird gleichbedeutend mit „zyklische Beanspruchung“ verwendet.
Ermüdungsfestigkeit:	Beschreibt den „Zeitpunkt“ des Versagens unter Ermüdungsbeanspruchung. Kombination aus Ermüdungsbeanspruchung und Bruchlastwechselzahl.
Ermüdungsverhalten:	Wird gleichbedeutend mit „Materialverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung“ verwendet.
High-Cycle-Fatigue:	Umfasst den Bereich zyklischer Versuche mit Bruchlastwechselzahlen $N > 10^3$.
Low-Cycle-Fatigue:	Umfasst den Bereich zyklischer Versuche mit Bruchlastwechselzahlen $N < 10^3$.
Materialverhalten:	
Monoton steig. Beanspr.:	Spannungs-Dehnungslinie, Festigkeit, Bruchspannung.

Ermüdungsbeanspruchung:	Entwicklung der Dehnungen bzw. Steifigkeiten, Ermüdungsfestigkeit.
Dauerstandbeanspruchung:	Entwicklung der Dehnungen bzw. Steifigkeiten, Belastungsdauer bis zum Versagen.
Oberdehnung:	Dehnung bei Ermüdungsbeanspruchung zum Wirkungszeitpunkt der maximalen Spannung (Oberspannung).
Oberspannungsniveau:	Oberspannung bezogen auf die Druckfestigkeit; auch „bezogene Oberspannung“.
Referenzdruckfestigkeit der Ermüdungsbeanspruchung:	Mittelwert der Druckfestigkeiten, die vor den Ermüdungsversuchen an Proben der gleichen Geometrie und der gleichen Charge festgestellt werden. Sie dient als Grundlage für die Festlegung der Belastung im Ermüdungsversuch.
Sinusversuch:	Kurz für: Zyklischer Versuch mit sinusförmiger Last-Zeit-Funktion.
Unterdehnung:	Dehnung bei Ermüdungsbeanspruchung zum Wirkungszeitpunkt der minimalen Spannung (Unterspannung).
Unterspannungsniveau:	Unterspannung bezogen auf die Druckfestigkeit; auch „bezogene Unterspannung“.
Versuchsblock:	Umfasst Versuche u. U. verschiedener Versuchsreihen, die in einem begrenzten Zeitraum ohne längere Unterbrechung im Block durchgeführt wurden.
Versuchsreihe:	Versuche u. U. verschiedener Versuchsserien zu einer gemeinsamen Fragestellung (z. B. Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Bruchlastwechselzahl).
Versuchsserie:	Verschiedene Versuche mit gleichartiger Belastung; Versuche einer Versuchsserie sind Wiederholungsversuche.
Vorzeichendefinition:	Die durchgeführten Untersuchungen umfassen ausschließlich den Druck- bzw. den Druckschwellbereich. Bei den ermittelten Dehnungen handelt es sich daher ausschließlich um Stauchungen des Betons. Im Rahmen dieser Arbeit werden Druckspannungen und Stauchungen als positive Werte angegeben. Die Stauchungen werden dabei als Dehnungen bezeichnet, was im Bereich der Betonermüdung dem gängigen Sprachgebrauch entspricht.

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

d	Durchmesser des Probekörpers
E_s	Elastizitätsmodul ermittelt als Sekantenmodul im Entlastungsast bei Ermüdungsbeanspruchung
\bar{E}_s	Gefälle der Steifigkeitsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung
f_c	Druckfestigkeit von Beton
$f_{c,xxd}$	xx-Tage-Druckfestigkeit von Beton
$f_{c,cube}$	Würfeldruckfestigkeit von Beton
$f_{c,cube,xxd}$	xx-Tage-Würfeldruckfestigkeit von Beton
$f_{c,cyl}$	Zylinderdruckfestigkeit von Beton
$f_{c,imp}$	Festigkeit bei erhöhter Belastungsgeschwindigkeit (Model Code 1990)
$f_{c,imp,k}$	Festigkeit bei erhöhter Belastungsgeschwindigkeit (Model Code 2010)
f_{cm}	Mittelwert der Druckfestigkeit von Beton aus Referenzversuchen
F_{cm}	Mittelwert der zur Druckfestigkeit von Beton gehörenden Druckkraft aus Referenzversuchen
$f_{cm,v}$	Mittelwert der Druckfestigkeit von Beton bei erhöhter Belastungsgeschwindigkeit
$f_{cm,cube150}$	mittlere Würfeldruckfestigkeit von Beton, Würfel mit 150 mm Kantenlänge
$f_{cm,cube100}$	mittlere Würfeldruckfestigkeit von Beton, Würfel mit 100 mm Kantenlänge
f_{cd}	Bemessungswert der Betondruckfestigkeit
$f_{cd,fat}$	Bemessungswert der Druckfestigkeit von Beton bei Ermüdungsbeanspruchung
f_{ck}	charakteristische Zylinderdruckfestigkeit von Beton
$f_{ck,fat}$	charakteristische Druckfestigkeit von Beton bei Ermüdungsbeanspruchung
f	Frequenz zyklischer Belastungen
f_p	Prüffrequenz, Belastungsfrequenz im zyklischen Versuch

F_{\max}	maximale Prüfkraft bei Ermüdungsbeanspruchung, Oberlast
F_{\min}	minimale Prüfkraft bei Ermüdungsbeanspruchung, Unterlast
k	Beiwert zur Beschreibung des nichtlinearen Betonverhaltens bei monoton steigender Druckbeanspruchung (Eurocode 2)
\dot{k}	Prüfgeschwindigkeit, kraftgeregelt
\dot{k}_{ers}	Ersatzgeschwindigkeit, kraftgeregelt
h	Höhe des Probekörpers
$\log N_f$	logarithmierte Bruchlastwechselzahl (dekadischer Logarithmus)
n	Umfang einer Stichprobe
N	Lastwechselzahl
N_f	Bruchlastwechselzahl
R	Spannungsverhältnis $R = S_U/S_O$
r^2	Bestimmtheitsmaß
RH	relative Luftfeuchte
s	Standardabweichung einer Stichprobe
s^2	Varianz einer Stichprobe
$S_{c,\max} = S_O = \sigma_O/f_c$	auf die Druckfestigkeit bezogene Oberspannung bei Ermüdungsbeanspruchung, „Oberspannungsniveau“
$S_{c,\min} = S_U = \sigma_U/f_c$	auf die Druckfestigkeit bezogene Unterspannung bei Ermüdungsbeanspruchung, „Unterspannungsniveau“
ΔS	auf die Druckfestigkeit bezogene Schwingweite
S_D	auf die Druckfestigkeit bezogene Spannung bei Dauerstandbelastung
$S_{D,f}$	Dauerstandfestigkeit (relativ zur Druckfestigkeit)
$S_{O,v}$	auf die Druckfestigkeit bei erhöhter Belastungsgeschwindigkeit bezogene Oberspannung bei Ermüdungsbeanspruchung
$S_{U,v}$	auf die Druckfestigkeit bei erhöhter Belastungsgeschwindigkeit bezogene Unterspannung bei Ermüdungsbeanspruchung
t	Dauer, Belastungsdauer
t_U	Belastungsdauer bis zum Versagen
v	Belastungsgeschwindigkeit allgemein
$\Delta V/V$	Volumenänderung

\dot{w}	Prüfgeschwindigkeit weggeregelt
\bar{x}	Mittelwert einer Stichprobe

Griechische Buchstaben

α	Irrtumswahrscheinlichkeit
α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient
$\dot{\varepsilon}$	Dehngeschwindigkeit, Dehnrage
$\bar{\varepsilon}$	Steigung in den Phasen der Dehnungsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung und bei Dauerstandbeanspruchung
ε	Dehnung
ε^A	Amplitude der Dehnung
$\varepsilon^B, \varepsilon_D^B$	Bruchdehnung bei Ermüdungsbeanspruchung bzw. bei Dauerstandbeanspruchung
ε_c bzw. ε_{cm}	Einzel- bzw. Mittelwert der Dehnung bei Druckfestigkeit
ε_{cu} bzw. ε_{cum}	Einzel- bzw. Mittelwert der Bruchdehnung bei monoton steigender Druckbeanspruchung
ε^M	Dehnungsmittellage
ε_D	Dehnung bei Dauerstandbeanspruchung
ε_{el}^0	elastische Dehnung des nicht vorbelasteten Betons
ε_{el}^d	elastische Dehnung nach vorheriger Degradation
ε_L	Längsdehnung
$\varepsilon_O ; \varepsilon_U$	Oberdehnung bzw. Unterdehnung: Dehnung bei Ober- bzw. Unterspannung (Ermüdungsbeanspruchung)
ε_{pl}	plastische Dehnung
$\varepsilon_{v-el,ir}$	irreversible visko-elastische Dehnung bei Ermüdungsbeanspruchung
$\varepsilon_{v-el,rev}$	reversible visko-elastische Dehnung bei Ermüdungsbeanspruchung
σ_A	Spannungsamplitude bei Ermüdungsbeanspruchung
$2\sigma_A, \Delta\sigma$	Doppelspannungsamplitude, Schwingweite
σ_{cu} bzw. σ_{cum}	Einzel- bzw. Mittelwert der Bruchspannung des Betons bei monoton steigender Beanspruchung
σ_M	Mittelspannung bei Ermüdungsbeanspruchung

σ_o	Oberspannung bei Ermüdungsbeanspruchung
σ_u	Unterspannung bei Ermüdungsbeanspruchung
$\dot{\sigma}$	Spannungsgeschwindigkeit

Abkürzungen

LB	Leichtbeton
NB	Normalbeton
NC	Normalfester Beton
HPC	High performance concrete – Hochfester Beton
UHPC	Ultra high performance concrete – Ultra-hochfester Beton
PVC	Polyvinylchlorid
VB	Versuchsblock
WF	Wellenform
w/z-Wert	Wasser-Zementwert

Symbols

Roman Letters

d	diameter of specimen
E_s	modulus of elasticity determined as secant modulus in the descending part of the cycles (fatigue loading)
\bar{E}_s	gradient of development of stiffness (fatigue loading)
f_c	compressive strength of concrete
$f_{c,xxd}$	xx-day compressive strength of concrete
$f_{c,cube}$	compressive cube strength of concrete
$f_{c,cube,xxd}$	xx-day compressive cube strength of concrete
$f_{c,cyl}$	compressive cylinder strength of concrete
$f_{c,imp}$	compressive strength of concrete under high rates of loading (Model Code 1990)
$f_{c,imp,k}$	compressive strength of concrete under high rates of loading (Model Code 2010)
f_{cm}	mean value of concrete compressive strength of reference tests
F_{cm}	mean value of the compressive force belonging to the compressive strength of reference tests
$f_{cm,v}$	mean value of concrete compressive strength for high rates of loading
$f_{cm,cube150}$	mean value of concrete compressive cube strength, cube with 150 mm height
$f_{cm,cube100}$	mean value of concrete compressive cube strength, cube with 100 mm height
f_{cd}	design value of concrete compressive strength
$f_{cd,fat}$	design value of concrete compressive strength for fatigue loading
f_{ck}	characteristic value of concrete compressive strength
$f_{ck,fat}$	characteristic value of concrete compressive strength for fatigue loading
f	frequency of cyclic loading
f_p	loading frequency in fatigue tests

F_{\max}	maximum axial force under fatigue loading
F_{\min}	minimum axial force under fatigue loading
k	factor describing the nonlinear concrete behaviour under monotonically increasing compressive loading (Eurocode 2)
\dot{k}	rate of loading, force-controlled
\dot{k}_{crs}	substitutive rate of loading, force-controlled
h	height of specimens
$\log N_f$	logarithmised number of cycles to failure (decadic logarithm)
n	sample size
N	number of cycles
N_f	number of cycles to failure
R	stress ratio $R = S_U/S_O$
r^2	coefficient of determination
RH	relative humidity
s	standard deviation of a sample
s^2	variance of a sample
$S_{c,\max} = S_O = \sigma_O/f_c$	maximum stress level under fatigue loading
$S_{c,\min} = S_U = \sigma_U/f_c$	minimum stress level under fatigue loading
ΔS	relative amplitude related to the compressive strength, level of amplitude (peak-to-peak)
S_D	stress level under sustained loading
$S_{D,f}$	level of concrete strength under sustained loading
$S_{O,v}$	maximum stress level under fatigue loading related to the compressive strength under high loading rates
$S_{U,v}$	minimum stress level under fatigue loading related to the compressive strength under high loading rates
t	duration of loading
t_U	duration of loading until failure
v	rate of loading (in general)
$\Delta V/V$	change of volume

Symbols

\dot{w}	rate of loading, displacement-controlled
\bar{x}	mean value of a sample
Greek letters	
α	significance level
α_T	coefficient of thermal expansion
$\dot{\varepsilon}$	strain rate
$\bar{\varepsilon}$	gradient in the phases of the development of strain under fatigue loading or sustained loading
ε	strain
ε^A	amplitude of strain
$\varepsilon^B, \varepsilon_D^B$	strain at failure under fatigue loading, sustained loading
$\varepsilon_c, \varepsilon_{cm}$	single and mean value of concrete strain at maximum compressive stress
$\varepsilon_{cu}, \varepsilon_{cum}$	single and mean value of concrete strain at failure under compression
ε^M	mean position of strain (fatigue loading)
ε_D	strain under sustained loading
ε_{el}^0	elastic strain of not preloaded concrete
ε_{el}^d	elastic strain of concrete after degradation
ε_L	longitudinal strain
$\varepsilon_O; \varepsilon_U$	strain at maximum stress level, strain at minimum stress level (fatigue loading)
ε_{pl}	plastic strain of concrete
$\varepsilon_{v-el,ir}$	irreversible visco-elastic strain (fatigue loading)
$\varepsilon_{v-el,rev}$	reversible visco-elastic strain (fatigue loading)
σ_A	semi stress amplitude (fatigue loading)
$2\sigma_A, \Delta\sigma$	peak-to-peak stress amplitude (fatigue loading)
$\sigma_{cu}, \sigma_{cum}$	single value, mean value of strain at failure for concrete under monotonically increasing loading
σ_M	mean stress (fatigue loading)
σ_O	maximum stress (fatigue loading)

σ_U	minimum stress (fatigue loading)
$\dot{\sigma}$	rate of stress change

Abbreviation

LB	lightweight concrete
NB	normalweight concrete
NC	normal strength concrete
HPC	high performance concrete – high strength concrete
UHPC	ultra high performance concrete – ultra high strength concrete
PVC	polyvinyl chloride
VB	block of experimental tests
WF	waveform
w/z-Wert	water-cement ratio

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Bauwerke des klassischen Stahlbeton- und Spannbetonbaus sind durch massive Querschnitte geprägt, bei denen die ständigen Lasten typischerweise größer sind als die veränderlichen Lasten. In der Summe ergeben sich für solche Bauwerke kaum ermüdungswirksame Belastungen. Die Weiterentwicklungen in der Betontechnologie führten in den letzten Jahrzehnten zu Hochleistungsbetonen mit immer höheren Festigkeiten, wobei die gleichzeitige Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften auch die Realisierung schlanker Stahlbeton- und Spannbeton-Konstruktionen ermöglicht. Bei solchen schlanken Bauwerken bzw. Bauteilen ist das Verhältnis der ständigen Lasten zu den veränderlichen Lasten kleiner, sodass für die Bemessung zunehmend ermüdungswirksame Beanspruchungen relevant werden. Zusätzlich bringen die Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte neue Bauwerkstypen hervor, für die ermüdungswirksame Beanspruchungen charakteristisch sind, wie z. B. Windenergieanlagen oder weitgespannte Brückenkonstruktionen für den Hochgeschwindigkeitszugverkehr.

In den derzeit gültigen nationalen und internationalen Regelwerken sind hinsichtlich der Betonermüdung Bemessungsverfahren enthalten, die im Kern alle ein vergleichbares Konzept beinhalten und im Wesentlichen auf Forschungsergebnissen aus den 1980er Jahren und davor basieren.

Der Ermüdungsnachweis für Beton ist oft als dreistufiges Nachweisverfahren geregelt, bei dem die Genauigkeit des Nachweises mit den Stufen der Nachweisführung steigt. In der ersten Stufe wird der Nachweis mittels eines Vergleichs der ermüdungsrelevanten Spannung mit einer Grenzspannung geführt. Bei Nichteinhaltung der Grenzspannung wird in der zweiten Stufe die Anzahl auftretender Lastwechsel der maßgebenden Ermüdungsbeanspruchung einer zulässigen Lastwechselzahl gegenübergestellt. In der dritten Stufe wird der Nachweis unter Berücksichtigung von Kollektiven der Ermüdungsbeanspruchung auf Grundlage der linearen Schadensakkumulationshypothese nach *Palmgren-Miner* aus den Jahren 1924 bzw. 1945 geführt. Dabei ist allgemein bekannt, dass die für metallische Werkstoffe entwickelte Schadensakkumulationshypothese das Betonverhalten unter Ermüdung jedoch nur unzureichend abbilden kann (z. B. [Zhang et al. – 1997]).

Bei Beton geht die Erhöhung der Druckfestigkeit mit einem zunehmend spröderen Materialverhalten einher. Vor diesem Hintergrund bestehen Befürchtungen, dass hochfeste Betone

gegenüber normalfesten Betonen ein ungünstigeres Ermüdungsverhalten zeigen. Der Ermüdungswiderstand hochfester Betone wird daher gegenüber dem normalfester Betone im Ermüdungsnachweis rechnerisch drastisch reduziert, sodass das Potential hochfester Betone bei weitem nicht ausgenutzt werden kann [Lohaus et al. – 2012]. Die Realisierung schlanker Konstruktionen wird hierdurch stark erschwert, teilweise sogar verhindert.

Die derzeit angewandten Bemessungsverfahren für Betonermüdung beinhalten sehr grobe Herangehensweisen bei der Berücksichtigung des Materialwiderstands, was größtenteils auf die auch heute noch bestehenden Wissenslücken zurückzuführen ist. Als Folge wird die Ermüdungsbemessung den neuen betontechnologischen und konstruktiven Entwicklungen nicht gerecht. Dies führt dazu, dass der Ermüdungsnachweis für immer mehr Bauwerke aufgrund erhöhter ermüdungswirksamer Beanspruchungen und/oder aufgrund des nicht nutzbaren Festigkeitsvorteils hochfester Betone kaum erfüllt werden kann. Vor diesem Hintergrund ist die Erforschung des Materialwiderstands von Beton von besonderer Bedeutung, um den Ermüdungsnachweis auf Basis eines besseren Verständnisses der Ermüdungsmechanismen fortentwickeln zu können und so zukünftig die Umsetzung innovativer betontechnologischer und konstruktiver Lösungen zu unterstützen und nicht zu behindern.

Hochzyklisch beanspruchte Bauwerke müssen ermüdungswirksamen Belastungen mit bis zu $N = 10^9$ Lastwechseln über ihre gesamte Nutzungsdauer von mehreren Jahrzehnten widerstehen. Die Beanspruchungsart Ermüdung ist daher nicht realitätsnah prüfbar. Die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens im Labor kann nur dann effektiv erfolgen, wenn die Dauer der Untersuchungen deutlich kürzer ist als die Dauer der Ermüdungsbeanspruchung in der Realität. Dementsprechend ist es für Ermüdungsuntersuchungen charakteristisch, dass sie experimentellen Zeitrafferverfahren entsprechen, um das Ermüdungsversagen im Versuch in einer begrenzten Zeit zu erreichen. Im Experiment werden daher in der Regel höhere Beanspruchungsniveaus und/oder höhere Belastungsfrequenzen verwendet als sie in der Realität tatsächlich vorhanden sind. Hierdurch treten jedoch prüftechnische Einflüsse auf das Materialverhalten von Betonen auf, die es wiederum zu erfassen und zu beschreiben gilt, um das Ermüdungsverhalten bei realer Beanspruchung als Basis für entsprechende Nachweisformate beschreiben zu können.

Beton unter Ermüdungsbeanspruchung ist bereits seit ca. 100 Jahren Gegenstand der Forschung. Die bisher dokumentierten Untersuchungen beschränkten sich jedoch zum größten Teil auf die Feststellung der Bruchlastwechselzahlen zur Charakterisierung des Versagenszeitpunktes sowie auf die Untersuchung von Einflüssen auf die Bruchlastwechselzahlen. Das grundsätzliche Vorgehen bei der Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Betonen entsprach in der Vergangenheit insofern oftmals dem Prinzip „trial-and-error“ bzw. „Versuch-und-Bruch“. Das Verformungs- und Steifigkeitsverhalten von Betonen unter Ermüdungsbeanspruchung, und somit die schädigenden Auswirkungen zyklischer Beanspruchungen auf das Materialverhalten, wurden bisher kaum systematisch untersucht. Insbesondere die von den

Bruchlastwechselzahlen bekannten Einflüsse verschiedener zyklischer Belastungsparameter wurden in Bezug auf das Verformungs- und Steifigkeitsverhalten bisher nicht systematisch betrachtet. Dementsprechend sind in der Literatur nur vereinzelte Erkenntnisse zum Dehnungs- und Steifigkeitsverhalten von Betonen bei Ermüdungsbeanspruchung dokumentiert.

Dabei liegen für hochfeste Betone deutlich weniger Ergebnisse vor als für normalfeste Betone. Für die dringend notwendige substantielle Fortentwicklung der heute gültigen Bemessungsverfahren fehlt somit grundlegendes Wissen zum Materialverhalten von Beton unter zyklischen Belastungen. Um die groben Herangehensweisen in den Bemessungsverfahren zu verfeinern und damit differenziertere und genauere Bemessungsergebnisse zu ermöglichen, sind in einem ersten Schritt detailliertere Erkenntnisse zum Ermüdungsverhalten, insbesondere hochfester Betone, erforderlich.

Darüber hinaus sind Ermüdungsuntersuchungen sehr zeitaufwendig und sie benötigen eine spezielle Maschinenteknik. Vor diesem Hintergrund wären Prüfverfahren vorteilhaft, die es ermöglichen, das Ermüdungsverhalten und das Ermüdungsversagen anhand einfacher durchführbarer und/oder weniger aufwendiger Versuche zu charakterisieren. In der Literatur sind hierzu Ansätze dokumentiert, das Dehnungsverhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchungen anhand des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender Beanspruchung oder Dauerstandbeanspruchung zu beschreiben. Diese Ansätze wurden bisher jedoch nicht anhand von Versuchsdaten überprüft.

Insgesamt betrachtet, konzentrierte sich die bisherige Forschung im Bereich der Betonermüdung zum überwiegenden Teil auf die Beschreibung des Ermüdungsversagens. Das Verformungs- und Steifigkeitsverhalten wurde bisher kaum systematisch untersucht. Daher bestehen hierzu auch heute noch große Wissenslücken, die insbesondere die Fortentwicklung der Betonbauweise behindern.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, grundlegende Erkenntnisse zum Dehnungs- und Steifigkeitsverhalten hochfester Betone zu ermitteln, um so das Ermüdungsverhalten von Beton besser untersuchen, verstehen und beschreiben zu können. Es werden von den Bruchlastwechselzahlen bekannte, material- und prüfbedingte Einflüsse mit dem Ziel untersucht, diese Einflüsse auch im Hinblick auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen zu überprüfen und sie adäquat beschreiben zu können. Insgesamt soll ein neuer Weg für die Erforschung des Ermüdungsverhaltens von Betonen aufgezeigt werden, der weg von dem bisher überwiegenden Vorgehen nach dem Prinzip „trial-and-error“ hin zu einem stärker mechanismenorientierten Vorgehen führt. Hierbei sollen die in der Literatur enthaltenen Hypothesen zum Ermüdungsverhalten von Beton genauso überprüft und beurteilt werden, wie die dokumentierten Ansätze zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens anhand der Spannungs-Dehnungslinien infolge monoton steigender Beanspruchung bzw. anhand der Dehnungsentwicklung infolge Dauerstandbeanspruchung. In dieser Arbeit werden insofern grundlegende Fragestellungen im Bereich der Betonermüdung betrachtet, um so zur Schließung der existierenden Wissenslücken beizutragen. Die Untersuchungsergebnisse sollen in eine Modellvorstellung zur Beschreibung der baustofflichen Phänomene bei Ermüdungsbeanspruchung übertragen und so eine Verallgemeinerbarkeit der Erkenntnisse erreicht werden.

Ausgehend von einer Literaturrecherche werden die Ergebnisse umfangreicher experimenteller Untersuchungen an einem hochfesten Beton bei monoton steigender Beanspruchung, Ermüdungsbeanspruchung und Dauerstandbeanspruchung vorgestellt, wobei ausschließlich der Druckbereich betrachtet wird. Die systematische Analyse der Einflüsse aus bezogener Oberspannung, Belastungsfrequenz und Last-Zeit-Funktion auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung unter Ermüdungsbeanspruchung steht dabei im Fokus dieser Arbeit.

Diese Analyse stellt die Basis dar für die weitergehenden Untersuchungen möglicher Anknüpfungspunkte bei der Beschreibung des Ermüdungsverhaltens auf Grundlage des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung. Das Materialverhalten des hochfesten Betons bei den drei Beanspruchungsarten wird bei besonderer Abstimmung der Beanspruchungshöhen und der Belastungsgeschwindigkeiten vergleichend untersucht und ausgewertet, um so die in der Literatur dokumentierten Ansätze zu überprüfen. Hierzu werden die derzeit vorhandenen und gegenüber früheren Untersuchungen verbesserten Erfassungs- und Auswertungsmöglichkeiten von Betonverformungen genutzt. Aufbauend auf den so gewonnenen Erkenntnissen sollen die in der Literatur dokumentierten Ansätze zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Betonen anhand der Dehnungen beurteilt werden.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit sollen gleichzeitig eine Basis für eine bessere Beurteilung des Ermüdungswiderstands von Betonen bzw. hochfesten Betonen darstellen, auch im Zusammenhang mit den gültigen Bemessungsregeln. Hierfür sind die Erkenntnisse zu den prüf-

dingten Einflüssen infolge der Ermüdungsprüfung im Zeitrafferverfahren von besonderer Bedeutung.

1.3 Gliederung der Arbeit

Zunächst werden in Kapitel 2 die in der Literatur dokumentierten Erkenntnisse zum Materialverhalten von Beton unter monoton steigender Beanspruchung, zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung zusammengestellt. Hierbei werden die wesentlichen Einflüsse auf das Materialverhalten bei der jeweiligen Beanspruchungsart, wie die Betondruckfestigkeit, die Belastungsgeschwindigkeit und die Höhe der Beanspruchung, herausgearbeitet. Weitergehend werden in der Literatur dokumentierte Ergebnisse und Ansätze zur kombinierten Beschreibung des Betonverhaltens bei monoton steigender Beanspruchung, Ermüdungsbeanspruchung und Dauerstandbeanspruchung dargestellt. Anschließend werden in Kapitel 3 die Arbeitsbereiche definiert und erläutert sowie konkrete Fragen formuliert, die sich aus der Literaturlauswertung ergeben haben. Des Weiteren werden die in der Literatur dokumentierten Hypothesen zum Ermüdungsverhalten von Beton zusammengestellt, die anhand der eigenen Versuchsergebnisse beurteilt werden sollen.

Im folgenden Kapitel 4 werden die experimentellen Untersuchungen und ihre Durchführung beschrieben. Die experimentellen Untersuchungen wurden mit besonderem Augenmerk auf die Abstimmung hinsichtlich Beanspruchungshöhen und Belastungsgeschwindigkeiten bzw. Belastungsfrequenzen geplant. Das zugrunde liegende Untersuchungskonzept wird in diesem Kapitel genauso erläutert wie der Versuchsaufbau und die verwendete Messtechnik. Abschließend wird das grundsätzliche Vorgehen bei der Auswertung der Messdaten beschrieben.

In den anschließenden Kapiteln werden die Versuchsergebnisse der eigenen Untersuchungen vorgestellt und grundlegend ausgewertet. Kapitel 5 behandelt die Versuche mit monoton steigender Beanspruchung, die bei unterschiedlich hohen Belastungsgeschwindigkeiten durchgeführt wurden. In Kapitel 6 werden die Versuchsergebnisse der Ermüdungsversuche dargestellt und ausgewertet, wobei hierbei zwischen den Bruchlastwechselzahlen und den Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen unterschieden wird. Kapitel 7 beinhaltet die Ergebnisse und Auswertungen der Dauerstandversuche, die ebenfalls mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten durchgeführt wurden. Die in Kapitel 5, Kapitel 6 und Kapitel 7 enthaltenen Auswertungen dienen dabei insbesondere der Vorbereitung der in Kapitel 8 dargestellten kombinierten Betrachtungen der drei untersuchten Beanspruchungsarten. Hier werden die Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf die in der Literatur vorhandenen Ansätze zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens anhand des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung ausgewertet.

Basierend auf den Erkenntnissen, die in den vorherigen Kapiteln dokumentierten sind, werden in Kapitel 9 die Hypothesen zum Ermüdungsverhalten von Beton beurteilt. In Kapitel 10 werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen in eine Modellvorstellung zur Beschreibung baustofflicher Phänomene übertragen und die Anwendung dieser Modellvorstellung anhand der Versuchsergebnisse gezeigt. Abschließend wird eine neue Hypothese zu den Gefügeständen von Betonen bei unterschiedlichen zyklischen Beanspruchungen und Beanspruchungsarten vorgestellt.

Diese Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

Kapitel 2

Materialverhalten von Beton

2.1 Monoton steigende Druckbeanspruchung

2.1.1 Spannungs-Dehnungslinie

Beton ist ein inhomogener Werkstoff. Zur Charakterisierung des Materialverhaltens von Beton werden daher verschiedene Skalenebenen betrachtet. Im Allgemeinen können drei Ebenen unterschieden werden [Wittmann – 1987], [Streit – 1991], [Schwabach – 2005], die in Abbildung 2.1 dargestellt sind.

Auf der Makroebene wird der Beton als homogener Werkstoff betrachtet. Auf der Mesoebene besteht der Beton aus dem Zementstein und den eingebetteten Gesteinskörnern, wobei auch die Kontaktzonen zwischen Gesteinskörnung und Zementstein das Materialverhalten beeinflussen. Der Zementstein wird dabei als homogen, zusammengesetzt aus dem Zementgel, Feinanteilen der Gesteinskörnung, Poren und Rissen, betrachtet. Auf der Mikroebene werden die Eigenschaften des Zementsteins sowie die der Kontaktzone zwischen Gesteinskörnern und Zementstein auf der kristallinen Ebene beschrieben. Für die Beschreibung des experimentell erfassten Materialverhaltens von Beton werden Modelle auf der Makro- und Mesoebene verwendet.

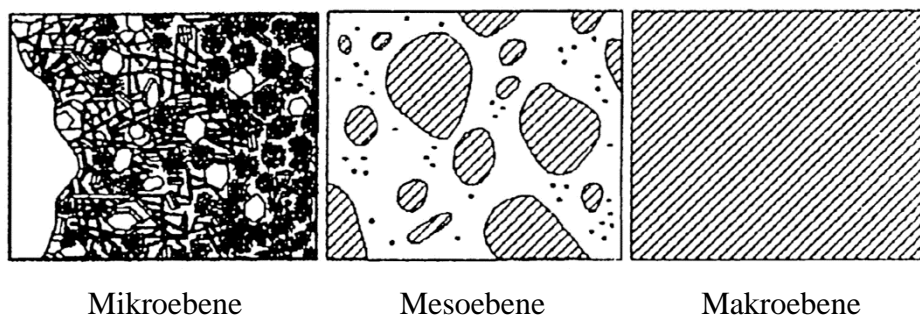


Abbildung 2.1: Skalenebenen für Beton [Wittmann – 1987] nach [Schwabach – 2005]

Auf der Makroebene wird das Materialverhalten von Beton bei monoton steigender Beanspruchung durch die Spannungs-Dehnungslinie unter Berücksichtigung der Längsdehnung beschrieben (auch „Arbeitslinie“ genannt) (vgl. Abbildung 2.2). Diese ist gekennzeichnet durch einen zunächst linearen Anstieg der Dehnungen mit steigender Spannung. Bei normal-

festen Betonen geht dieses lineare Verhalten bei ca. 30 – 40% der Druckfestigkeit zunehmend in ein nicht-lineares Verhalten über [Chen – 1982], [Schwabach – 2005]. Bei weiterer Steigerung der Beanspruchung wird die Linearitätsgrenze erreicht. Im Beanspruchungsbereich bis zur Linearitätsgrenze ist das Verhältnis der Querdehnung zur Längsdehnung annähernd konstant [Schwabach – 2005]. Spannungen oberhalb der Linearitätsgrenze führen zu irreversiblen Verformungsanteilen [König et al. – 2001]. Bei weiterer Steigerung der Beanspruchung ist die Diskontinuitätsgrenze erreicht, wenn die Volumendehnungskurve einen nichtlinearen Verlauf zeigt [Iravani / MacGregor – 1998]. Das Volumen des Betons nimmt bei steigender Druckbeanspruchung bis ca. 70 – 90% der Druckfestigkeit weiter ab [Chen – 1982], [Schwabach – 2005]. Dieser Punkt wird als kritische Spannung bezeichnet [Schickert – 1980], [Siebel – 1989]. Nach dem Überschreiten der kritischen Spannung ist eine deutliche Volumenzunahme zu verzeichnen [Chen – 1982]. Vor dem Erreichen der Maximalspannung kommt es zu einer starken Zunahme der Längsdehnungen. Nach dem Erreichen der Maximalspannung fällt die Spannung ab, wobei die Dehnung überproportional ansteigt.

Wird die Mesoebene betrachtet, so weisen Betone bereits vor der äußeren Belastung feine Mikrorisse im Zementstein und in der Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Zementstein auf, z. B. infolge Schwinden und Temperaturbeanspruchung während der Hydratation [Wittmann – 1987], [Neville – 2011]. Bei Belastung breiten sich diese Mikrorisse aus und neue Risse entstehen. [Siebel – 1989] unterteilt den ansteigenden Ast der Spannungs-Dehnungslinie bei Belastung hinsichtlich der Rissentstehung und des Risswachstums in vier Phasen, die in Anlehnung an [Schwabach – 2005], [Neville – 2011] wie folgt beschrieben werden können und in Abbildung 2.2 dargestellt sind:

- Phase 1: Bestehende Risse werden überdrückt (keine Rissbildung durch äußere Lasten)
- Phase 2: Ausbreitung von Mikrorissen zwischen Gesteinskörnung und Matrix;
Entstehung neuer Mikrorisse
- Phase 3: Entstehung von Gefügerissen in der Matrix und evtl. in der Gesteinskörnung;
Mikrorisse in den Kontaktzonen werden durch Risse in der Matrix verbunden
- Phase 4: Vereinigung von Mikrorissen zu Makrorissen und Entstehung von
Bruchflächen

In der ersten Phase werden die bereits aus der Betonherstellung vorhandenen Poren und Risse durch die aufgebrachte Beanspruchung überdrückt. Bei weiterer Steigerung der Beanspruchung wird bei Normalbeton hauptsächlich die Gesteinskörnung, aufgrund ihrer gegenüber dem Zementstein höheren Steifigkeit, belastet. Hierdurch treten Spannungsspitzen auf, die an den Korngrenzen zur Entstehung von Mikrorissen und zum Wachstum bereits vorhandener Mikrorisse führen. In der dritten Phase breiten sich die Mikrorisse in die Zementsteinmatrix aus. In der vierten und letzten Phase wachsen die entstanden Mikrorisse zu Makrorissen zusammen, die zum Versagen des Betons führen [Chen – 1982], [Schwabach – 2005]. Die ersten drei Phasen werden als stabile Rissbildungsphasen bezeichnet, da es hier zum Wachstum

bzw. zu der Bildung von Mikrorissen kommt [Schickert – 1980], [Schwabach – 2005]. Das Risswachstum in Phase vier wird als instabil bezeichnet. In dieser Phase entstehen Makrorisse und das Betongefüge wird zerstört [Chen – 1982]. Die Phasen 2 – 4 gehen kontinuierlich ineinander über. Insbesondere hinsichtlich des Übergangs von Phase 2 zu Phase 3 besteht in der Literatur kein Konsens darüber, ob der Übergang durch die Linearitätsgrenze oder die Diskontinuitätsgrenze markiert wird.

Die auf die Druckfestigkeit bezogenen, relativen Beanspruchungshöhen an den Phasenübergängen werden in der Literatur unterschiedlich angegeben. Die Dehnungs- und Volumenänderung, die beschriebenen Phasen und die Bereichseinteilungen sind in Abbildung 2.2 für normalfesten Beton entsprechend der Angaben in [Glücklich – 1968], [Chen – 1982], [Siebel – 1989], [Schwabach – 2005], [Neville – 2011] zusammenführend dargestellt.

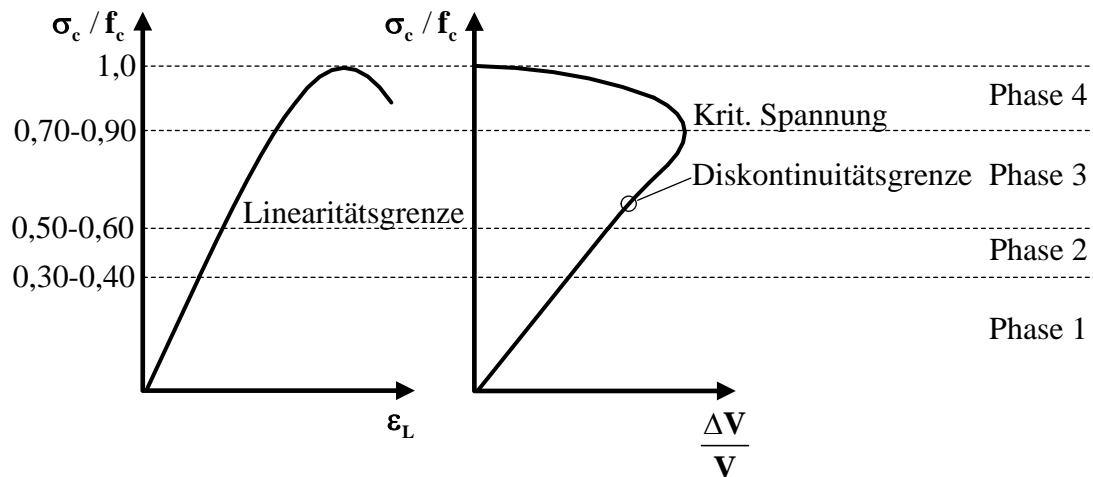


Abbildung 2.2: Verlauf der Längsdehnung ε_L und der Volumenänderung $\Delta V/V$ für normalfesten Beton, zusammengeführt aus [Glücklich – 1968], [Chen – 1982], [Siebel – 1989], [Schwabach – 2005], [Neville – 2011]

Die im Versuch aufgezeichnete Verformung ist dabei abhängig von der Art der Verformungsmessung [Held – 1992]. Dementsprechend wird hiervon auch die ermittelte Spannungs-Dehnungslinie beeinflusst.

Das Materialverhalten von Beton unter monoton steigender Beanspruchung kann grundsätzlich im kraftgeregelten (bzw. spannungsgeregelten) oder weggeregelten (bzw. verformungs- oder dehnungsgeregelten) Versuch untersucht werden. Dabei kann der Bereich nach dem Erreichen der Druckfestigkeit aufgrund der in diesem Bereich abfallenden Spannung nur im weggeregelten Versuch erfasst werden. Die Ausprägung und Form des abfallenden Astes der Spannungs-Dehnungslinie ist im Allgemeinen stark abhängig von z. B. der Probekörpergeometrie, der Verformungsmessung und insbesondere von der Steifigkeit der Prüfmaschine [Carrasquillo et al. – 1981], [fib – 2008]. Inwieweit der abfallende Ast der Spannungs-Dehnungslinie das Materialverhalten von Betonen beschreibt, ist strittig. So bemerken

[Cotsovovs / Pavlović – 2008] durch die Spannungs-Dehnungslinie in diesem Bereich werde lediglich „...das Zusammenwirken von Probe und Prüfmaschine...“ beschrieben.

Bei kraft geregelter (bzw. spannungsgeregelter) Versuchsdurchführung ist die Verformung bzw. die Dehnung die Reaktion des Materials. Wird die Kraft im kraft geregelten Versuch linear, d. h. mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit, gesteigert, ist die Reaktion - die Dehnung und die Dehngeschwindigkeit - aufgrund des zuvor beschriebenen Materialverhaltens abschnittsweise nichtlinear. Im weggeregelten Versuch ist es entsprechend umgekehrt. Kraft- und weggeregelte Versuche führen daher in Abhängigkeit von dem untersuchten Beton zu etwas unterschiedlichen Ergebnissen [Rüsch – 1972]. So ergeben sich im verformungsgeregelten Versuch im Allgemeinen z. B. etwas kleinere Druckfestigkeiten [Dahl et al. – 1993]. Sobald der lineare Bereich der Spannungs-Dehnungslinie überschritten ist, geht auch der lineare Zusammenhang zwischen Spannungs- und Dehngeschwindigkeit verloren.

Die bei den Versuchen verwendete Regelungsart ist insbesondere bei Vergleichen der Bruchdehnungen zu beachten, da die Bruchdehnungen bei weg- oder verformungsgeregelten Versuchen, aufgrund des möglicherweise vorhandenen abfallenden Astes der Spannungs-Dehnungslinie, im Allgemeinen größer sind als bei kraft geregelter Versuchsdurchführung.

2.1.2 Einfluss der Betondruckfestigkeit

Im Gegensatz zu normalfesten Betonen weisen hochfeste Betone ein verringertes Kapillarporensystem des Zementsteins sowie eine dichtere Gefügestruktur auf. Darüber hinaus sind die Kontaktzonen zwischen Gesteinskörnung und Zementstein bei hochfesten Betonen gegenüber den Kontaktzonen bei normalfesten Betonen weniger gestört.

Die Verringerung des Kapillarporensystems wurde mit der Entwicklung von Fließmitteln ab Mitte der 1950er Jahre möglich. Durch den Einsatz von Fließmitteln wurde die Reduzierung des Wasserzementwertes (w/z) auf Werte $w/z < 0,40$ bei gleichzeitiger Gewährleistung der für eine gute Verarbeitbarkeit erforderlichen Konsistenz möglich. Die Weiterentwicklung und damit die Erhöhung der Effizienz der Fließmittel ermöglichte weitere Reduzierungen der w/z -Werte. Bei Wasserzementwerten $w/z < 0,40$ ist weniger Wasser vorhanden als zur vollständigen Hydratation erforderlich ist. Dementsprechend bleiben hochfeste Zementklinker bestehen, die die Festigkeit des Zementsteins zusätzlich erhöhen.

Darüber hinaus konnte durch die Verwendung von z. B. Mikrosilika und Flugasche die Kontaktzone zwischen Korn und Zementstein, die bis dato eine Schwachstelle im Betongefüge darstellte [Carrasquillo et al. – 1981a], wesentlich verbessert bzw. gestärkt werden. Gleichzeitig ist die Verwendung von Zementen mit hohen Normdruckfestigkeiten für die Herstellung hochfester Betone üblich. Die Unterschiede zwischen den Steifigkeiten der Gesteinskörnung und des Zementsteins sind bei höherfesten Betonen kleiner als bei normalfesten Betonen.

Für den Schritt hin zu ultra-hochfesten Betonen muss das Kapillarporensystem im Zementstein weiter reduziert und eine dichtere Gefügestruktur erzeugt werden. Der Wasserzementwert muss somit weiter verkleinert werden. Darüber hinaus werden die Korngrößen der verwendeten Gesteinskörnung sowie der weiteren Ausgangsstoffe besser aufeinander abgestimmt und so die Packungsdichte erhöht.

Das Materialverhalten bei monoton steigender Druckbeanspruchung ist zwischen normalfesten Betonen und hochfesten bzw. ultra-hochfesten Betonen signifikant unterschiedlich. Bereits vor der Erstbelastung sind die Risse in hochfesten Betonen kürzer und in einer geringeren Anzahl als bei normalfesten Betonen vorhanden [Ngab et al. – 1981a], [fib – 2008]. Aufgrund der geringeren Steifigkeitsunterschiede zwischen Zementstein und Gesteinskörnern ist der innere Spannungszustand bei hochfesten Betonen gleichmäßiger ausgeprägt als bei normalfesten Betonen. Als Folge entstehen weniger Mikrorisse [Aulia – 2005]. Bei hochfesten Betonen kommt es erst kurz vor dem Erreichen der Festigkeit, und somit wesentlich später als bei normalfesten Betonen, zu einem verstärkten Risswachstum [Aulia – 2005], [fib – 2008].

Makroskopisch zeigt sich dieses unterschiedliche Risswachstum an einem größeren und steiler verlaufenden linearen Bereich des ansteigenden Astes der Spannungs-Dehnungslinien hochfester Betone [Carrasquillo et al. – 1981], [FIP / CEB – 1990], [König et al. – 2001]. Auf Grundlage eigener Versuche geben [Iravani / MacGregor – 1998] den linearen Bereich bis ca. 65 % – 85 % der Druckfestigkeit für hochfeste Betone mit Druckfestigkeiten von 65 N/mm^2 – 125 N/mm^2 an. Hier stellen sie auch den Beginn eines instabilen Risswachstums fest. [Carrasquillo et al. – 1981a] stellten dagegen für den von ihnen untersuchten hochfesten Beton erst ab einer Beanspruchung von 95 % der Druckfestigkeit ein instabiles Risswachstum fest. Bei 95 % der Druckfestigkeit zeigte sich in den Untersuchungen von [Iravani / MacGregor – 1998] eine Abnahme des Volumens (kritische Spannung). Insgesamt ist der Literatur zu entnehmen, dass das instabile Risswachstum bei hochfesten Betonen bei einer höheren, auf die Druckfestigkeit bezogenen relativen Beanspruchung einsetzt als bei normalfesten Betonen.

In Abbildung 2.3 sind die Spannungs-Dehnungslinien eines normalfesten (links) und eines hochfesten Betons (rechts) gegenübergestellt. Zu sehen sind ergänzend die Spannungs-Dehnungslinien der Gesteinskörnungen und des Zementsteins. Es ist zu erkennen, dass neben der Druckfestigkeit auch die Steifigkeit und die Dehnung bei Maximalspannung bei hochfesten Betonen größer sind als bei normalfesten Betonen (vgl. auch [Carrasquillo et al. – 1981]). Zu sehen ist auch der größere lineare Bereich des ansteigenden Astes.

Anhand von Abbildung 2.3 wird deutlich, dass das Materialverhalten von hochfesten Betonen im Bereich des ansteigenden Astes der Spannungs-Dehnungslinie überwiegend durch die optimierten Eigenschaften des Zementsteins beeinflusst wird. Einen zusätzlichen positiven Effekt hat die verstärkte Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung [Carrasquillo et al. – 1981].

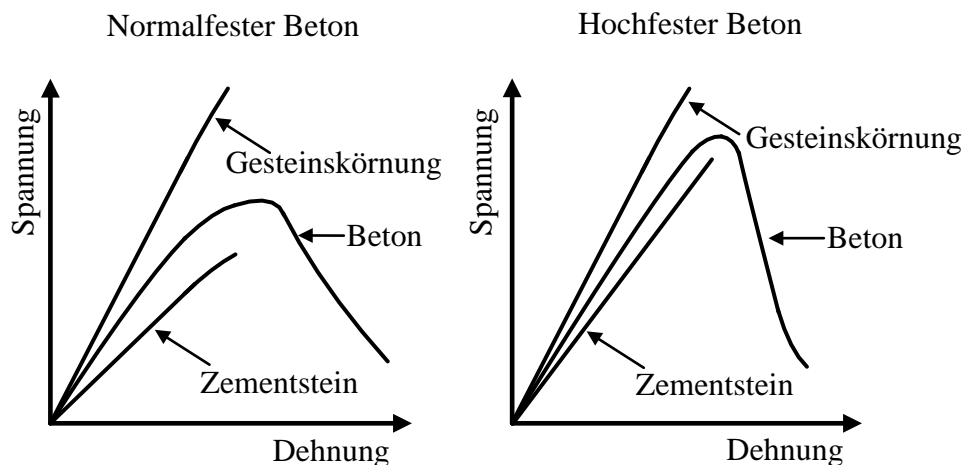


Abbildung 2.3: Vergleich der Spannungs-Dehnungslinien normalfester und hochfester Betone
[FIP / CEB – 1990]

Das Versagen tritt bei hochfesten Betonen schlagartig auf [Carrasquillo et al. – 1981a]. Der abfallende Ast der Spannungs-Dehnungslinie ist bei hochfesten Betonen steiler als bei normalfesten Betonen [König et al. – 2001]. Dabei verlaufen die Risse aufgrund der erhöhten Festigkeit des Zementsteins und der verbesserten Kontaktzone bei hochfesten Betonen auch durch die Gesteinskörnung [Carrasquillo et al. – 1981a], [Aulia – 2005].

In den Regelwerken Model Code 90 [CEB – 1988] bzw. Model Code 2010 [fib – 2013] und Eurocode 2 [DIN EN 1992-1-1 – 2011] mit [DIN EN 1992-1-1/NA – 2013] wird der Einfluss der Betonfestigkeit auf das Materialverhalten durch den in Gleichung 2.1 dargestellten Zusammenhang beschrieben. Gleichung 2.1 verwendet dabei die Parameterbezeichnungen aus Eurocode 2 [DIN EN 1992-1-1 – 2011].

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = -\frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta} \quad \text{für } 0 < |\varepsilon_c| < |\varepsilon_{cu1}| \quad (2.1)$$

Mit:

- $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$
- ε_{c1} Dehnung beim Höchstwert der Betondruckspannung
- ε_{cu} Bruchdehnung
- k Beiwert

Die Werte der eingehenden Parameter sind dabei im jeweiligen Regelwerk tabelliert. In Abbildung 2.4 ist Gleichung 2.1 entsprechend der Vorgaben nach [DIN EN 1992-1-1 – 2011] mit [DIN EN 1992-1-1/NA – 2013] für ausgewählte Betonfestigkeiten exemplarisch ausgewertet.

In [DIN EN 1992-1-1 – 2011] wird bis zur Festigkeitsklasse C70/85 von einer steigenden Dehnung bei Maximallast ausgegangen. Für höhere Festigkeitsklassen ist diese dann mit $\varepsilon_{cl} = 2,8\text{‰}$ konstant angegeben. Die Bruchdehnung ist für die Festigkeitsklassen C12/15 – C50/60 mit $\varepsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$ konstant angegeben. Für höhere Festigkeitsklassen wird von einer kleiner werdenden Bruchdehnung ausgegangen. Für die Klassen ab C80/95 entspricht die Bruchdehnung der Dehnung bei Maximallast. Dies entspricht der Tatsache, dass die experimentelle Ermittlung eines abfallenden Astes der Spannungs-Dehnungslinie umso schwieriger ist, je höherfester der Beton ist [Siebel – 1989].

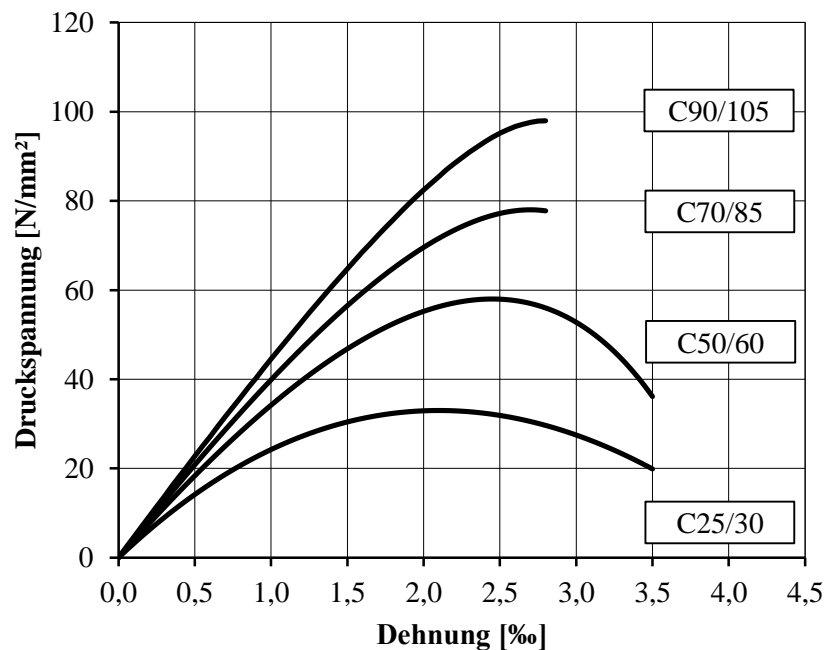


Abbildung 2.4: Spannungs-Dehnungslinien für verschiedene Betonfestigkeiten nach [DIN EN 1992-1-1 – 2011]

2.1.3 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit

Werden Bauwerke oder Bauteile betrachtet, so können den verschiedenen Einwirkungen verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten zugeordnet werden (vgl. Abbildung 2.5). Die Belastungsgeschwindigkeit wird in diesem Zusammenhang meistens als Dehngeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}$ [s^{-1}] angegeben. Die Belastungsgeschwindigkeit im Bauwerk und im Laborversuch ist insofern von erheblichem Interesse, da das Materialverhalten von Beton stark abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit ist [Rasch – 1962], [Rüsch – 1972].

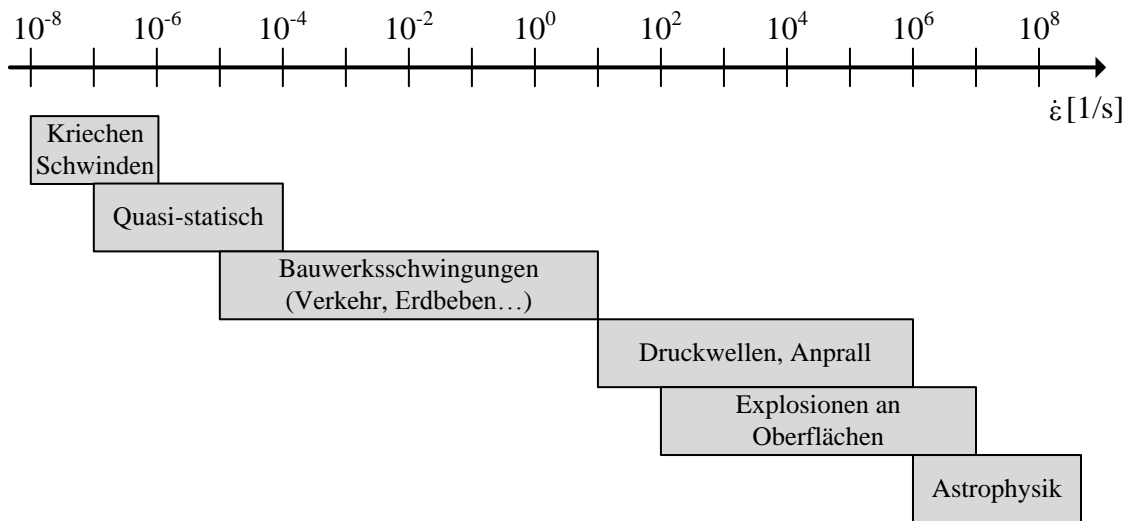


Abbildung 2.5: Dehngeschwindigkeiten für verschiedene Belastungsarten [fib – 2013]

Die Betondehnungen setzen sich im Gebrauchslastbereich aus einem elastischen Anteil (ϵ_{el} , zeitunabhängig, reversibel), einem visko-elastischen Anteil (ϵ_{v-el} , zeitabhängig, reversibel) und einem visko-plastischen Anteil (ϵ_{v-pl} , zeitabhängig, irreversibel) zusammen [Rüsch – 1972]. Der visko-elastische und der visko-plastische Anteil werden gemeinsam als „Kriechverformung“ ϵ_k bezeichnet. Die Anteile der Betondehnung sind in Abbildung 2.6 in Anlehnung an [Streit – 1991] dargestellt. Bei einer (unendlich) schnellen Belastung treten die elastischen Verformungen sofort auf. Im Bereich der konstant gehaltenen Belastung stellen sich dann die Kriechverformungen ein. Wird der Beton entlastet, so geht die elastische Verformung sofort zurück. Zeitlich verzögert nimmt auch die visko-elastische Verformung ab und schlussendlich bleibt der plastische Anteil der Kriechverformung bestehen.

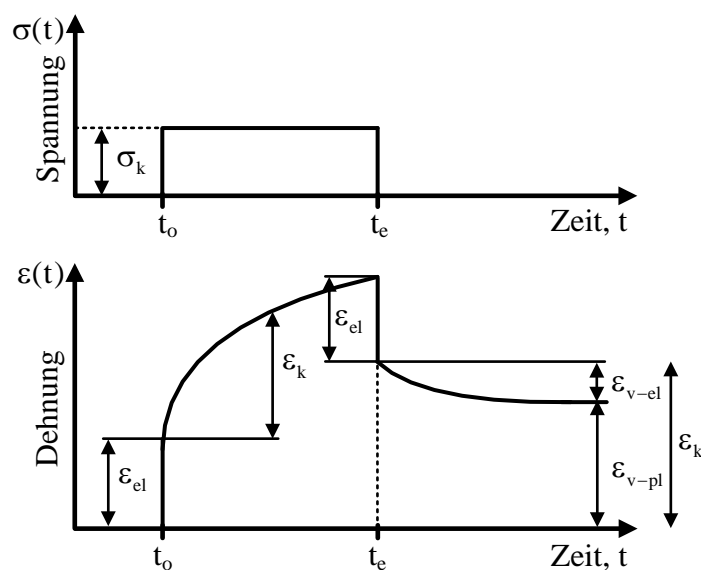


Abbildung 2.6: Anteile der Betondehnung, in Anlehnung an [Streit – 1991]

Im Lastbereich oberhalb der Linearitätsgrenze treten bei Belastung, zusätzlich zu den in Abbildung 2.6 enthaltenen Verformungsanteilen, in Abhängigkeit von der Beanspruchungshöhe sofortige, irreversible Verformungen infolge von Gefügezerstörungen auf. Bei andauernder hoher Beanspruchung kommt es zu zusätzlichen, nichtlinearen Kriechverformungen infolge von Mikrorissen, die ebenfalls zeitabhängig und irreversibel sind [Streit – 1991]. Lastunabhängig treten zusätzlich Schwindverformungen auf, die in Abbildung 2.6 nicht dargestellt sind.

Auch in der relativ kleinen Zeitspanne monoton steigender Beanspruchungen treten bereits zeitabhängige Verformungen auf. Je größer die Belastungsgeschwindigkeit bei monoton steigender Belastung ist, umso kleiner ist der Anteil zeitabhängiger Verformungen und umso steiler ist der Verlauf des ansteigenden Astes der Spannungs-Dehnungslinie des Betons [Rüsch – 1972], [Wesche / Krause – 1972]. Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Spannungs-Dehnungslinie bei monoton steigender Beanspruchung ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

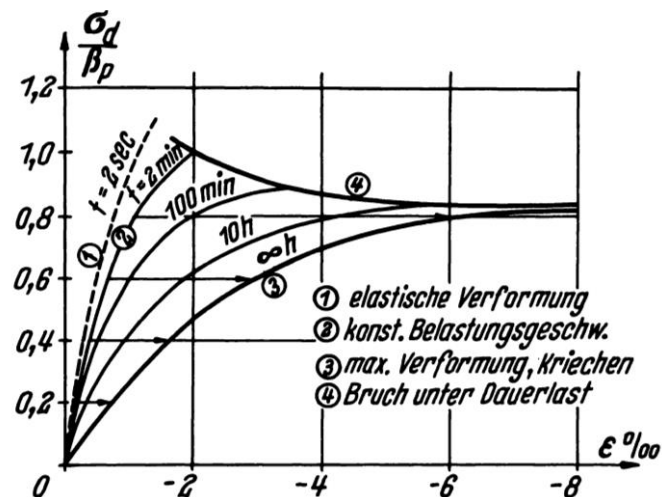


Abbildung 2.7: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Spannungs-Dehnungslinie von Beton [Rüsch – 1972]

Zum Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Materialverhalten normalfester und hochfester Betone sind bereits einige Untersuchungen in der Literatur dokumentiert. Bei dem überwiegenden Teil der Untersuchungen wurden die Versuche weg- oder verformungsgeregelt durchgeführt, wobei die angegebenen Dehngeschwindigkeiten je nach Untersuchung im Bereich von $\dot{\epsilon} = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ bis $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ liegen. Nur wenige Untersuchungen beinhalteten kraft- oder spannungsgeregelte Versuche, z. B. [Wesche / Krause – 1972], [Sparks / Menzies – 1973]. Diese Versuche wurden bei Spannungsgeschwindigkeiten im Bereich von $\dot{\sigma} = 10^{-3} \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ und $\dot{\sigma} = 50 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ durchgeführt. Im Folgenden wird in Bezug auf beide Regelungsarten zusammenfassend von „Beanspruchungsgeschwindigkeiten“ gesprochen. Die Regelungsart ist insbesondere beim Vergleich von Bruchdehnungen zu beachten (vgl. Abschnitt 2.1.1).

Die in der Literatur dokumentierten Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zeigen, dass die Steifigkeit normalfester und hochfester Betone durch die Erhöhung der Beanspruchungsgeschwindigkeit ansteigen [Awad / Hilsdorf – 1971], [Wesche / Krause – 1972], [Bresler / Bertero – 1975], [Sparks / Menzies – 1973], [Dahl et al. – 1993], [Zhang et al. – 2012]. Der Anstieg der Steifigkeit ist dabei weniger ausgeprägt als der Anstieg der Druckfestigkeiten [Han – 1996], [Zhang et al. – 2012].

Zum Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die Dehnung bei Maximallast bzw. auf die Bruchdehnung gibt es bisher keine einheitlichen Ergebnisse. Oft sind die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen diesbezüglich nicht eindeutig, z. B. [Sparks / Menzies – 1973], [Bresler / Bertero – 1975]. In Abbildung 2.8 sind drei Spannungs-Dehnungslinien eines normalfesten Betons für verschiedene Dehngeschwindigkeiten nach [Awad / Hilsdorf – 1971] gezeigt. Bei diesen Untersuchungen verkleinerten sich die Dehnung bei Maximallast und die Bruchdehnung bei höheren Beanspruchungsgeschwindigkeiten. Dagegen stellt [Reinhardt – 1987] fest, dass allgemein anerkannt sei, dass die Bruchdehnung bei steigender Belastungsgeschwindigkeit zunimmt.

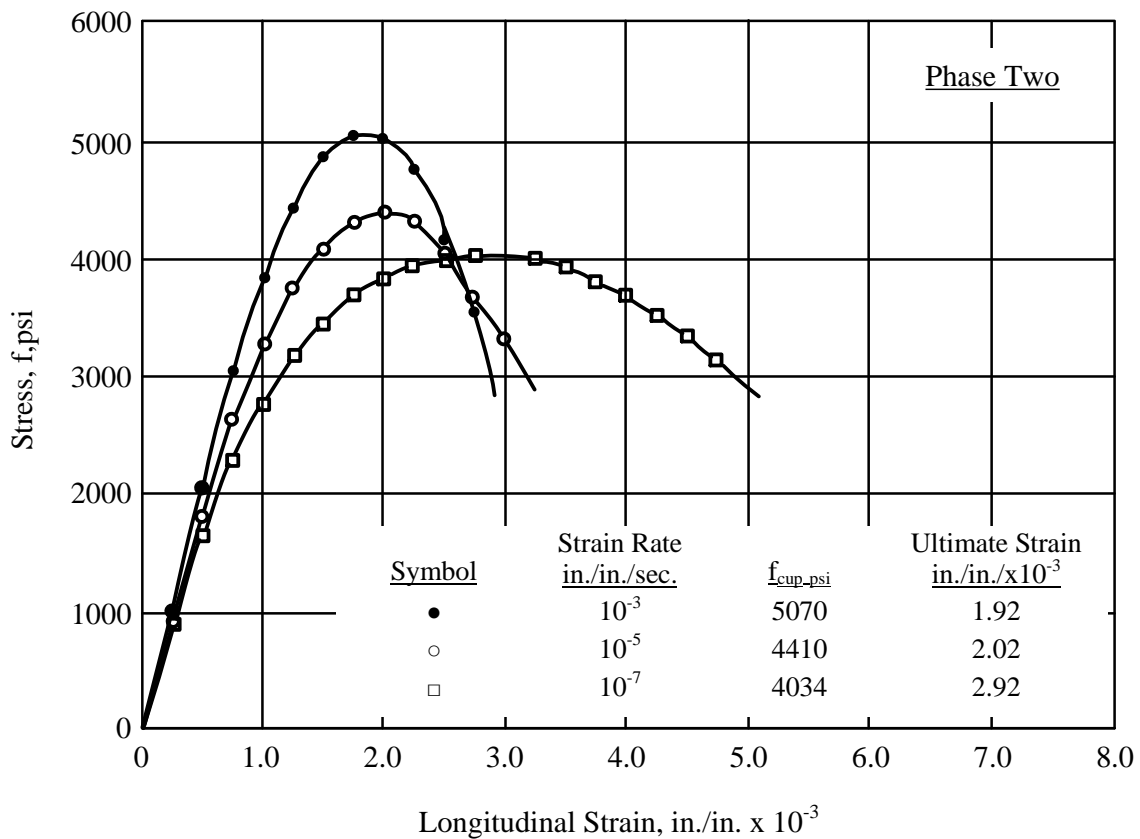


Abbildung 2.8: Spannungs-Dehnungslinien bei verschiedenen Beanspruchungsgeschwindigkeiten [Awad / Hilsdorf – 1971]

Einige in der Literatur dokumentierte Untersuchungen zeigen, dass der lineare Bereich der Spannungs-Dehnungslinie infolge erhöhter Beanspruchungsgeschwindigkeiten vergrößert wird [Awad / Hilsdorf – 1971], [Wesche / Krause – 1972], [Bresler / Bertero – 1975], [Han – 1996], wie auch anhand von Abbildung 2.8 zu sehen ist.

[Wesche / Krause – 1972] und [Zhang et al. – 2012] berichten, dass der Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der logarithmierten Beanspruchungsgeschwindigkeit durch eine Gerade approximiert werden kann. [Bischoff / Perry - 1991] werten eine Vielzahl von Literaturstellen mit einer großen Spannweite der Beanspruchungsgeschwindigkeiten aus und stellen den Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeitssteigerung und der Beanspruchungsgeschwindigkeit wie in Abbildung 2.9 dargestellt dar. In dieser Abbildung wurde der Geschwindigkeitsbereich zyklischer Beanspruchungen zu Orientierung ergänzend eingezeichnet.

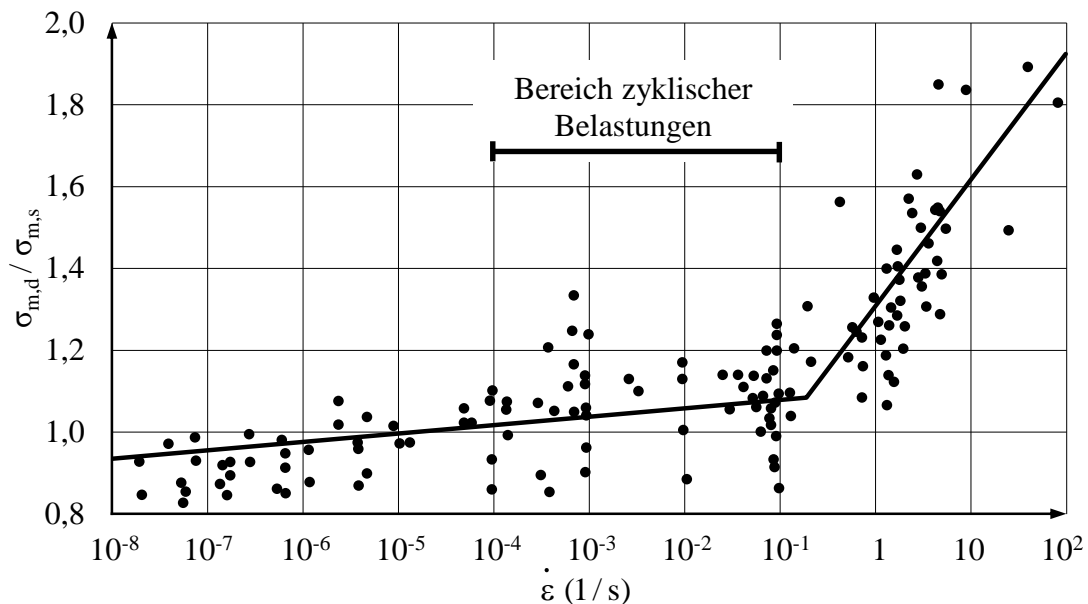


Abbildung 2.9: Linearer Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und logarithmierter Beanspruchungsgeschwindigkeit [Bischoff / Perry – 1986]

Nach [Reinhardt – 1987] und [Kim / Kim – 1996] wird das Materialverhalten hochfester Betone durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit weniger stark beeinflusst als das Verhalten normalfester Betone. [Han – 1996] stellt in seinen vergleichenden Versuchen an einem normalfesten und einem hochfesten Beton dagegen eine stärkere Beeinflussung des hochfesten Betons fest. Möglicherweise ist dies auf die von den anderen Untersuchungen abweichende Regelung der Prüfmaschine über die Querdehnung zurückzuführen.

[Sparks / Menzies – 1973], [Zhang et al. – 2012] berichten, dass das Materialverhalten hochfester Betone bei verschiedenen Beanspruchungsgeschwindigkeiten bedeutend von der Zusammensetzung abhängig ist.

Im Model Code 2010 [fib – 2013] und im Model Code 90 [CEB / FIP – 1993] sind jeweils Funktionen zur Beschreibung der Druckfestigkeitssteigerung infolge hoher Belastungsgeschwindigkeiten angegeben. Im Gegensatz zu Model Code 90 ist Model Code 2010 für hochfeste Betone bis zu einer charakteristischen Druckfestigkeit von $f_{ck} = 120 \text{ N/mm}^2$ anwendbar. Im Zuge der Überarbeitung von Model Code 90 wurden die Gleichungen zur Beschreibung der Festigkeitssteigerung angepasst. Die Zusammenhänge sind nachfolgend als Gleichung 2.2 ([CEB / FIP – 1993]) und Gleichung 2.3 ([fib – 2013]) für den für die eigenen Untersuchungen interessanten Geschwindigkeitsbereich angegeben.

Druckfestigkeitssteigerung nach Model Code 90:

$$f_{c,imp} / f_{cm} = (\dot{\sigma}_c / \dot{\sigma}_{c0})^{a_s} \quad \text{für } |\dot{\sigma}_c| \leq 10^6 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.2)$$

mit: $a_s = 1 / (5 + 9 \cdot f_{cm} / f_{cm0})$

$f_{c,imp}$ Festigkeit bei erhöhter Belastungsgeschwindigkeit

f_{cm} mittlere Betondruckfestigkeit

$\dot{\sigma}_c$ Spannungsgeschwindigkeit ($\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

$\dot{\sigma}_{c0}$ $-1 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

f_{cm0} 10 N/mm^2

Druckfestigkeitssteigerung Model Code 2010:

$$f_{c,imp,k} / f_{cm} = (\dot{\sigma}_c / \dot{\sigma}_{c0})^{0,014} \quad \text{für } |\dot{\sigma}_c| \leq 10^6 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.3)$$

mit: $f_{c,imp,k}$ Festigkeit bei erhöhter Belastungsgeschwindigkeit

f_{cm} Festigkeit bei $-1 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

$\dot{\sigma}_c$ Spannungsgeschwindigkeit ($\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

$\dot{\sigma}_{c0}$ $-1 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Es ist zu sehen, dass sich die Gleichungen lediglich in dem Exponenten unterscheiden. Bei Model Code 90 geht die mittlere Festigkeit des Betons in dem Exponenten ein. So werden für Betone niedrigerer Festigkeiten höhere Druckfestigkeitssteigerungen berücksichtigt. In Model Code 2010 ist nun ein konstanter Exponent angegeben. Somit ist die Festigkeitssteigerung nach Model Code 2010 unabhängig von der Druckfestigkeit des Betons.

In Abbildung 2.10 sind die Druckfestigkeitssteigerungen nach Model Code 2010 und Model Code 90 dargestellt. Die Druckfestigkeitssteigerung nach Model Code 90 wurde exemplarisch für drei Betonfestigkeitsklassen ausgewertet und dargestellt. Die Festigkeitssteigerung nach Model Code 2010 liegt im Bereich der Vorgaben des vorherigen Model Code 90 für einen Beton der Festigkeitsklasse C70/85.

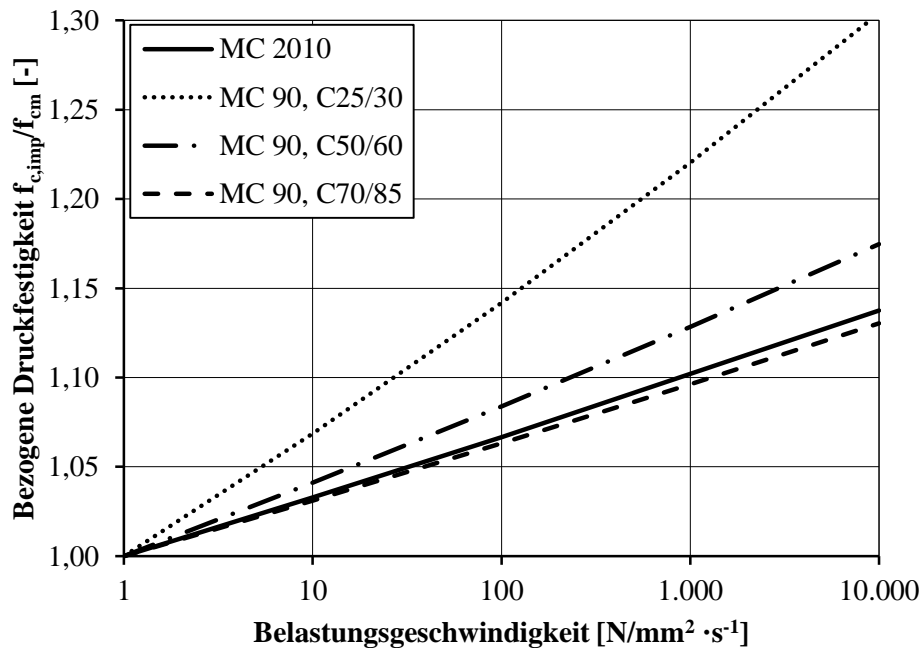


Abbildung 2.10: Geschwindigkeitsabhängige Druckfestigkeitssteigerung nach [fib – 2013] und [CEB / FIP – 1993]

2.1.4 Zusammenfassung und Beurteilung

Das Materialverhalten von Betonen wird geprägt durch die Eigenschaften des Zementsteins, der Gesteinskörnung und der Kontaktzonen zwischen diesen beiden Komponenten. Hochfeste Betone weisen eine dichtere Zementsteinmatrix und weniger gestörte Kontaktzonen auf. Daher zeigt sich makroskopisch ein anderes Materialverhalten als bei normalfesten Betonen. Neben der höheren Druckfestigkeit, der höheren Steifigkeit und der größeren Dehnung bei Maximallast, ist auch der lineare Bereich der Spannungs-Dehnungslinie wesentlich stärker ausgeprägt.

Die Entstehung und das Wachstum von Rissen bei normalfesten und hochfesten Betonen sind in Abhängigkeit von der relativen Beanspruchungshöhe unterschiedlich. So tritt ein instabiles Risswachstum bei hochfesten Betonen erst bei einer höheren relativen Beanspruchung auf. Hochfeste Betone versagen schlagartig. Der Bereich der Spannungs-Dehnungslinie nach dem Erreichen der Druckfestigkeit ist insbesondere für hochfeste Betone nicht gesichert experimentell ermittelbar (vgl. Abschnitt 2.1.2). Die Literaturlauswertung zeigt darüber hinaus, dass die im Versuch erfassbare Dehnungsentwicklung auch von der im Versuch verwendeten Regelungsart abhängig ist.

Das Materialverhalten von Beton ist zeitabhängig und damit abhängig von der Beanspruchungsgeschwindigkeit. Mit steigender Beanspruchungsgeschwindigkeit steigen, unabhängig von der Regelungsart, die Druckfestigkeit und die Steifigkeit an. Dabei gibt es Hinweise darauf, dass der Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die Steifigkeit weniger stark ausgeprägt sein könnte. Der lineare Bereich der Spannungs-Dehnungslinie vergrößert sich

infolge erhöhter Beanspruchungsgeschwindigkeiten. Hinsichtlich des Einflusses der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die Dehnung bei Maximallast und die Bruchdehnung sind in der Literatur widersprüchliche Angaben dokumentiert.

Für hochfeste Betone gibt es nur wenige dokumentierte Untersuchungen zum Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit und kaum Untersuchungen zum Einfluss auf die Dehnungen. Bei hochfesten Betonen ist der Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit möglicherweise weniger stark ausgeprägt. Gleichzeitig gibt es Hinweise darauf, dass nicht nur die Betonfestigkeit, sondern die Betonzusammensetzung ursächlich für einen unterschiedlich ausgeprägten Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit ist.

Das Materialverhalten hochfester Betone unter monoton steigender Belastung ist aufgrund des unterschiedlichen Betongefüges, insbesondere bei hohen relativen Beanspruchungen, abweichend von dem normalfester Betone. Im Hinblick auf zyklische Beanspruchungen und Dauerstandbeanspruchungen ist daher davon auszugehen, dass normalfeste und hochfeste Betone bei hohen Beanspruchungsniveaus ein unterschiedliches Materialverhalten zeigen.

2.2 Druckschwellbeanspruchung

2.2.1 Grundlagen

Experimentelle Untersuchungen

Unter dem Begriff Ermüdungsbeanspruchung wird im Allgemeinen eine sich häufig wiederholende Beanspruchung verstanden, wobei der Maximalwert der Beanspruchung kleiner als die Festigkeit des Materials ist. Charakteristisch für Ermüdungsbeanspruchungen ist, dass sie zum Versagen führen können, obwohl die Festigkeit des Materials nicht erreicht wird. Reale Ermüdungsbeanspruchungen weisen wechselnde Beanspruchungshöhen auf und sind meistens regellos. In experimentellen Untersuchungen werden diese Beanspruchungen durch periodische Wellenfunktionen idealisiert.

In [DIN 50100 – 1978] sind die wichtigsten Begriffe und Prüfverfahren zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit erläutert, wobei sich diese Norm im Wesentlichen auf die Prüfung metallischer Werkstoffe bezieht. Der Inhalt dieser Norm kann nicht vollständig auf die Ermüdungsprüfung von Beton und Stahlbeton übertragen werden. Anders als z. B. für die Ermittlung der Druckfestigkeit gibt es hinsichtlich der Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Betonen somit keine normativen Vorgaben zum Vorgehen und zu den zu verwendenden Beanspruchungsparametern in experimentellen Untersuchungen.

In den meisten experimentellen Untersuchungen werden sinusförmige Wellenfunktionen mit konstanten oder abschnittsweise konstanten Belastungsparametern verwendet. Bei verformungsgeregelten Versuchen wird die Verformung, ausgehend von einer vorgegebenen An-

fangsverformung, von Lastwechsel zu Lastwechsel um einen Verformungsbetrag gesteigert oder in jedem Lastwechsel eine bestimmte Kraft angefahren. Die Bruchlastwechselzahlen liegen bei dieser Art der Versuchsdurchführung im Allgemeinen bei deutlich weniger als 1000 Lastwechseln.

Der überwiegende Teil der in der Literatur dokumentierten Ermüdungsuntersuchungen wurde kraftgeregelt durchgeführt. Bei kraft geregelter Versuchsdurchführung werden als Parameter die mittlere Kraft und die Amplitude der Kraft vorgegeben. Alternativ hierzu können auch die maximale Kraft und die minimale Kraft vorgegeben werden. Festgelegt werden somit die betragsmäßig maximale Spannung, die sogenannte Oberspannung σ_O , und die betragsmäßig minimale Spannung, die sogenannte Unterspannung σ_U . Die Differenz zwischen der Ober- und Unterspannung wird als Doppelspannungsamplitude $2\sigma_A$ oder Spannungsschwingweite $\Delta\sigma$ bezeichnet. Die Schwingung erfolgt um die Mittelspannung σ_M mit der Spannungsamplitude σ_A . Als weiterer Parameter der zyklischen Beanspruchung ist die Anzahl der Lastwechsel pro Sekunde durch die Prüffrequenz f_P festgelegt. In Abbildung 2.11 sind die Parameter kraft geregelter Ermüdungsbeanspruchungen in Anlehnung an [DIN 50100 – 1978] schematisch dargestellt.

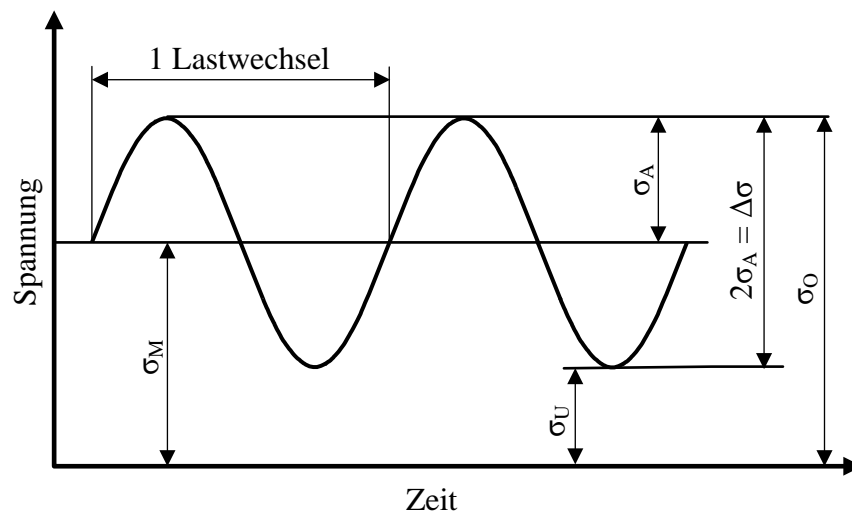


Abbildung 2.11: Parameter kraft geregelter Sinusschwingungen, angelehnt an [DIN 50100 – 1978]

Sind diese Parameter im Verlauf einer Ermüdungsbeanspruchung konstant, so wird von einem Einstufen-Versuch gesprochen. Diese Art von Versuchen wird auch als „Wöhlerversuche“ bezeichnet. Alternativ hierzu können mehrere Blöcke unterschiedlicher Lastwechselanzahlen mit variierenden Beanspruchungsparametern untersucht werden. In diesem Fall wird von einem Mehrstufen-Versuch gesprochen.

Ermüdungsbeanspruchungen, bei denen sowohl die Ober- als auch die Unterspannung im Druckbereich liegen, werden als Druckschwellbeanspruchung bezeichnet. Bei Zugschwellbeanspruchung liegen die Ober- und Unterspannungen im Zugbereich. Als Wechselbeanspruchung wird eine Ermüdungsbeanspruchung bezeichnet, bei der die Oberspannungen im Zug-

bereich und die Unterspannungen im Druckbereich liegen. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass Betone unter Druckschwellbeanspruchung die höchsten Bruchlastwechselzahlen erreichen. Bei Zugschwellbeanspruchung ist das Materialverhalten bereits sensibler [CEB – 1988]. Den geringsten Widerstand liefert Beton unter Wechselbeanspruchung [Cornelissen / Reinhardt – 1984].

In der experimentellen Praxis werden die Belastungen in Abhängigkeit von relativen Beanspruchungswerten festgelegt, die auf die Druckfestigkeit bezogen sind. So werden zunächst die bezogene Oberspannung S_O (auch mit S_{max} bezeichnet) und die bezogene Unterspannung S_U (auch mit S_{min} bezeichnet) bzw. die bezogene Mittelspannung S_M und die bezogene Amplitude S_A bzw. die bezogene Schwingweite ΔS festgelegt. Anschließend werden die absoluten Beanspruchungswerte als Eingangsparameter des Versuchs unter Berücksichtigung der mittleren Druckfestigkeit berechnet. Teilweise werden die bezogenen Beanspruchungen auch als Spannungsverhältnis $R = S_U/S_O$ angegeben.

Der Vorteil der Verwendung bezogener Beanspruchungswerte ist z. B. die hierdurch gewährleistete Vergleichbarkeit von Betonen unterschiedlicher Druckfestigkeiten. Die tatsächlichen Festigkeiten der ermüdungsbeanspruchten Proben können jedoch aufgrund natürlicher Schwankungen von dem vorab festgestellten Mittelwert der Festigkeit abweichen. In diesem Fall weicht dann auch die tatsächliche bezogene Beanspruchung von dem vorgesehenen Beanspruchungsniveau ab und das Prüfergebnis wird beeinflusst.

Die Ergebnisse von Wöhlerversuchen werden als Wertepaare aus bezogener Oberspannung und logarithmierter Bruchlastwechselzahl im Wöhlerdiagramm dargestellt, wobei auch die bezogene Unterspannung angegeben wird (vgl. Abbildung 2.12).

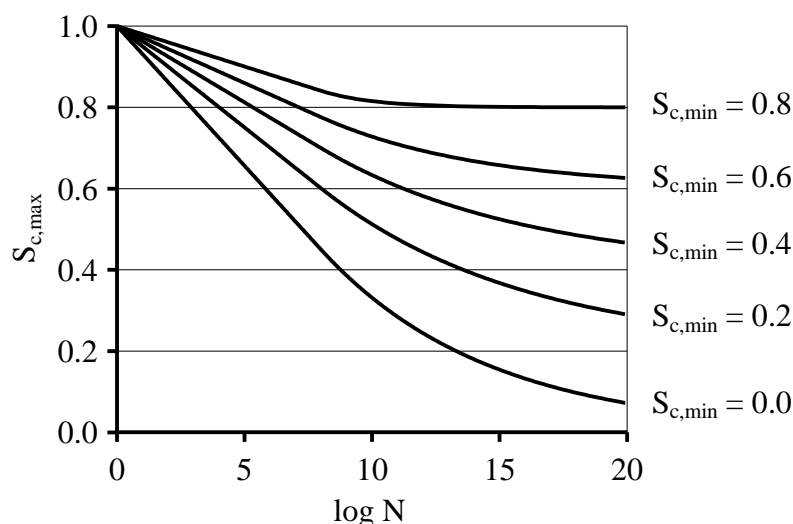


Abbildung 2.12: Wöhlerkurven für verschiedene bezogene Unterspannungen nach [fib – 2013]

Zur Ermittlung der als Bezugswerte der Beanspruchungsniveaus verwendeten Festigkeiten gibt es ebenfalls keine normativen Vorgaben. Sie sollten jedoch an Proben mit den gleichen

Eigenschaften (z. B. Geometrie, Herstellung, Lagerung, Vorbereitung, Alter) wie die für die Ermüdungsuntersuchungen vorgesehenen Proben geprüft werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden diese Druckfestigkeiten als „Referenzdruckfestigkeiten“ der Ermüdungsbeanspruchung bezeichnet.

Ermüdungsfestigkeit und Bruchlastwechselzahlen

Ermüdungsversuche werden in der Regel bis zum Versagen, dem Ermüdungsbruch, durchgeführt. Ermittelt wird in erster Linie die Bruchlastwechselzahl, also die Anzahl der Lastwechsel bis zum Ermüdungsbruch. Als Ermüdungsfestigkeit wird im Allgemeinen die Bruchlastwechselzahl bei einer bestimmten schwingenden Beanspruchung bezeichnet. Der Begriff „Ermüdungsfestigkeit“ beschreibt den Zeitpunkt des Ermüdungsversagens als Kombination aus Beanspruchung und Bruchlastwechselzahl. Dagegen wird der Begriff „Ermüdungsverhalten“ in dieser Arbeit gleichbedeutend mit dem Ausdruck „Materialverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung“ verwendet und schließt explizit neben der Ermüdungsfestigkeit die Verformungs-, Dehnungs-, Steifigkeits- und Schädigungsentwicklung im Ermüdungsprozess mit ein.

Bruchlastwechselzahlen weisen im Allgemeinen relativ hohe Streuungen auf, deren Größe mit abnehmender Spannungsamplitude tendenziell zunimmt, z. B. [Holmen – 1979]. Als Konsequenz hieraus werden im Allgemeinen jeweils mehrere Wiederholungsversuche für eine zyklische Beanspruchung durchgeführt. Die Streuungen der Bruchlastwechselzahlen konnten von einigen Autoren auf die Streuungen der Druckfestigkeit zurückgeführt werden, vgl. z. B. [Weigler / Freitag – 1975], [Cornelissen / Reinhardt – 1984], [Wefer – 2010]. Diesbezüglich weisen [Tepfers / Kutti – 1979] darauf hin, dass sich Streuungen der Festigkeiten besonders bei zyklischen Belastungen mit hohen bezogenen Oberspannungen auswirken.

Ermüdungsbeanspruchungen werden anhand der auftretenden Lastwechselzahlen in drei Bereiche, den Low-Cycle-Fatigue, High-Cycle-Fatigue und Very-High-Cycle-Fatigue, unterteilt. Die üblicherweise verwendeten Bereichsgrenzen sind zusammen mit Beispielen an Bauwerkstypen in Abbildung 2.13 dargestellt [Hsu – 1981].

Im Versuch ist die Beanspruchungshöhe im Low-Cycle-Fatigue am größten und nimmt über die anderen Bereiche ab. Gleichzeitig werden für Untersuchungen in den verschiedenen Bereichen unterschiedliche Prüffrequenzen gewählt. So können experimentelle Untersuchungen bei relativ niedriger Beanspruchung und damit sehr hohen Bruchlastwechselzahlen z. B. im Very-High-Cycle-Fatigue nur mit sehr hohen Prüffrequenzen in einem noch akzeptablen Zeitraum durchgeführt werden. Gleichzeitig ist es nicht sinnvoll, Versuche bei relativ hoher Beanspruchung und somit kleinen Bruchlastwechselzahlen z. B. bis $N_f = 1000$ mit einer sehr hohen Prüffrequenz durchzuführen.

Ermüdung			
Low-Cycle-Fatigue	High-Cycle-Fatigue		Very-High-Cycle-Fatigue
Bauwerke unter Erdbebenbeanspruchung	Rollbahnen und Brücken auf Flugfeldern	Autobahn- und Eisenbahnbrücken Fahrbahndecken von Autobahnen, Betonschwellen	Bauwerke für Hochgeschwindigkeitsbahnverkehr Offshore-Bauwerke
10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴
			10 ⁵
			10 ⁶
			10 ⁷
			10 ⁸
Lastwechselzahl			

Abbildung 2.13: Bereichseinteilung Ermüdung, nach [Hsu – 1981]

Zur Vermeidung extrem langer Prüfzeiten wird im Allgemeinen eine Lastwechselzahl festgelegt, bei deren Erreichen der Ermüdungsversuch gestoppt wird. Diese Lastwechselzahl wird im Allgemeinen in Abhängigkeit von der Prüffrequenz gewählt, um so die Versuchsdauer effektiv zu begrenzen. Proben, bei denen bis zum Erreichen dieser Lastwechselzahl kein Versagen eintritt, werden als „Durchläufer“ bezeichnet.

Dehnungsentwicklungen und Steifigkeitsentwicklungen

Die meisten in der Literatur dokumentierten Ermüdungsuntersuchungen konzentrieren sich auf die Untersuchung der Bruchlastwechselzahlen sowie auf die Untersuchung verschiedener Einflüsse auf die Bruchlastwechselzahlen. Es können jedoch zusätzlich zu den Bruchlastwechselzahlen die Dehnungen in Längs- und Querrichtung messtechnisch erfasst und ausgewertet werden.

Die Datenerfassung bei den in der Literatur dokumentierten Forschungsarbeiten, insbesondere bei denen verschiedenen Alters, erfolgte entsprechend der technischen Möglichkeiten unterschiedlich. In einigen in der Literatur dokumentierten, älteren Untersuchungen wurden die Dehnungen lediglich während einzelner Zwischensequenzen erfasst, d. h. manuell abgelesen (vgl. z. B. [Tepfers et al. – 1973], [Suter / Mickleborough – 1975]). Innerhalb dieser Zwischensequenzen wurde die zyklische Belastung unterbrochen und die Oberspannung mit einer langsameren Geschwindigkeit angefahren, um die zugehörigen Verformungen ablesen zu können. Eine Beeinflussung der gemessenen Dehnung ist wahrscheinlich.

Heute ist grundsätzlich eine kontinuierliche Erfassung oder eine Erfassung zu bestimmten Zeitpunkten des Ermüdungsprozesses wählbar. Die Art der Erfassung wird in erster Linie in Abhängigkeit von der wissenschaftlichen Zielsetzung festgelegt, wobei diese Wahl entscheidend von den Möglichkeiten und Kapazitäten der Datenerfassung, -speicherung und

-weiterverarbeitung beeinflusst wird. Auch die Dokumentation der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen im Rahmen von Veröffentlichungen in der Art, dass sie für andere Wissenschaftler nutzbar sind, ist ungleich aufwendiger als bei den Bruchlastwechselzahlen.

Häufig werden die Dehnungsverläufe über die Laufzeit eines Versuchs ausgewertet. Hierbei werden im Allgemeinen die Verformungen bei Oberspannung und/oder bei Unterspannung je Lastwechsel erfasst oder aus den Messdaten herausgefiltert. Werden die zugehörigen Dehnungen berechnet und über der Lastwechselzahl N oder über der Belastungsdauer t bzw. über der bezogenen Lastwechselzahl N/N_f oder über der bezogenen Belastungsdauer t/t_U aufgetragen, so ergeben sich für Betone s-förmige Dehnungsentwicklungen, die drei Phasen aufweisen. In Abbildung 2.14 sind die Dehnungsentwicklung bei Oberspannung und Unterspannung schematisch dargestellt.

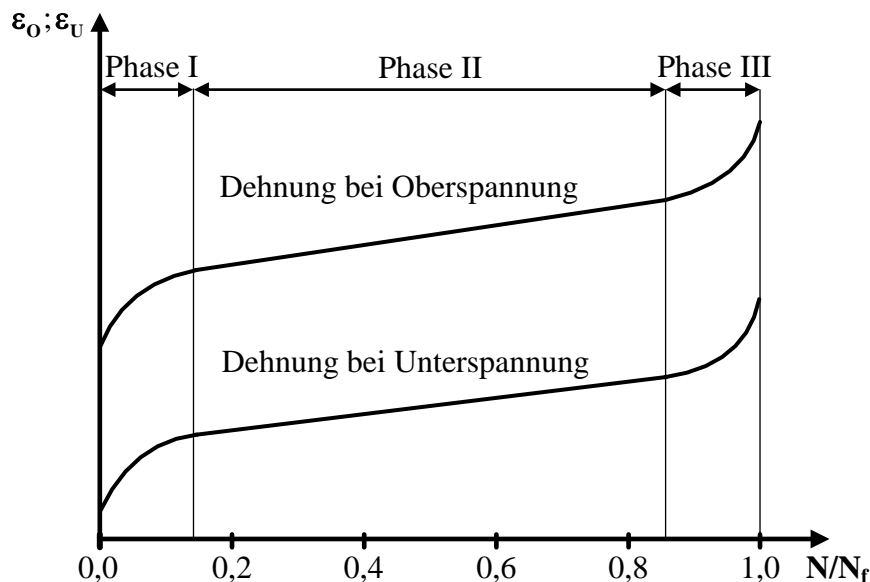


Abbildung 2.14: Dehnungsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung (schematisch)

In der Literatur wird beschrieben, dass die erste Phase durch einen überproportionalen Anstieg der Verformungen infolge des Anwachsens von Mikrorissen geprägt ist. In der zweiten Phase folgt ein annähernd linearer Anstieg der Verformungen infolge eines stabilen Risswachstums. In der dritten Phase kommt es dann zu einer Lokalisierung der Mikrorissbildung und die Verformungen nehmen infolge dieses instabilen Risswachstums erneut überproportional bis zum Versagen zu [Klausen – 1978]. Für normalfeste Betone werden die Phasenübergänge von verschiedenen Autoren bei ca. 10 – 20 % und ca. 80 – 90 % der Bruchlastwechselzahl angegeben ([Holmen – 1979], [Klausen – 1978], [Weigler / Rings – 1987]).

Zusätzlich zur Betrachtung der Dehnungen über den Verlauf des Ermüdungsprozesses ist die Betrachtung der Dehnungen im Lastwechsel möglich, die sogenannte Hysterese. Verschiedene in der Literatur dokumentierte Untersuchungen zur Ermüdung von Betonen haben gezeigt, dass sich die Spannungs-Dehnungs-Beziehung im Lastwechsel im Verlauf der Ermüdungsbe-

anspruchung verändert (z. B. [Mehmel / Kern – 1962]). Dabei ändern sich die Krümmungen der Belastungsäste von einer konkaven zu einer konvexen Form. Gleichzeitig verkleinert sich die Steigung der Be- und Entlastungsäste sowie die von der Hysterese eingeschlossene Fläche über die Lastwechsel (vgl. Abbildung 2.15). Die Abnahme der Steigung der Be- und Entlastungsäste ist gleichbedeutend mit der Abnahme der Steifigkeit des Betons im Ermüdungsprozess.

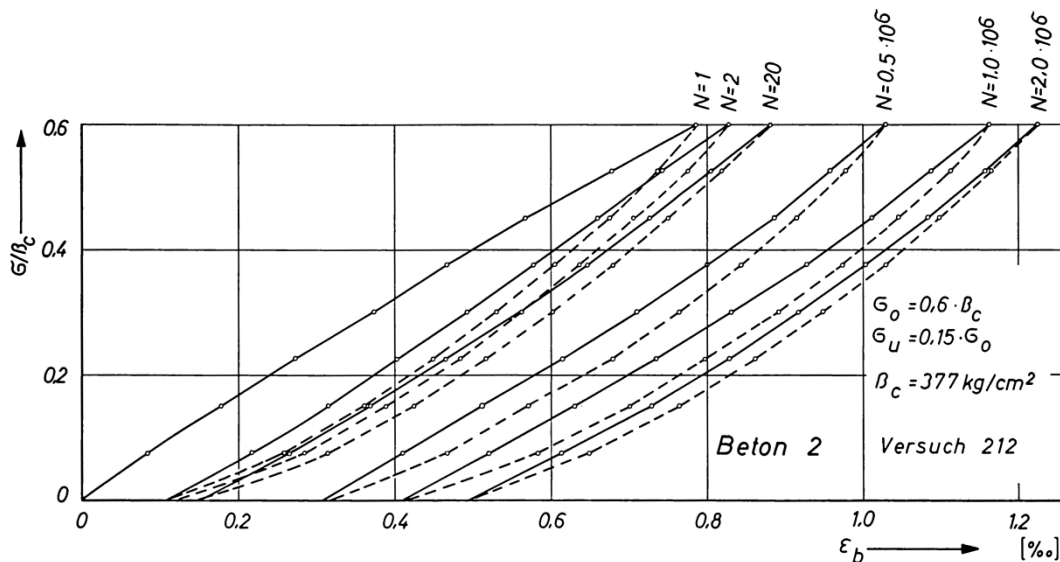


Abbildung 2.15: Veränderung der Hysteresen mit steigender Anzahl Lastwechsel
[Mehmel / Kern – 1962]

Im Bereich der Betonermüdung ist es allgemein üblich, die Steifigkeit als Sekantenmodul im Entlastungsast zwischen dem Maximum und dem Minimum der Hysterese zu ermitteln (vgl. z. B. [Holmen – 1979], [Schwabach – 2005]). Der Sekantenmodul berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$E_s = \frac{\sigma_o - \sigma_U}{\epsilon_o - \epsilon_U} \quad (2.4)$$

In Abbildung 2.16 ist der im Entlastungsast ermittelte Sekantenmodul schematisch dargestellt. Der Sekantenmodul steht bei kraft geregelter Versuchsdurchführung und gleich bleibender Spannungsamplitude, d. h. bei Einstufen-Versuchen, in direktem Zusammenhang mit dem Verlauf der Amplitude der Dehnung. Ein abfallender Sekantenmodul ist bei konstanter Spannungsamplitude damit gleichbedeutend mit einer größer werdenden Amplitude der Dehnung. Der Verlauf der Steifigkeit über die Ermüdungslebensdauer ist also in erster Linie von den Dehnungsentwicklungen bei Ober- und Unterspannung abhängig.

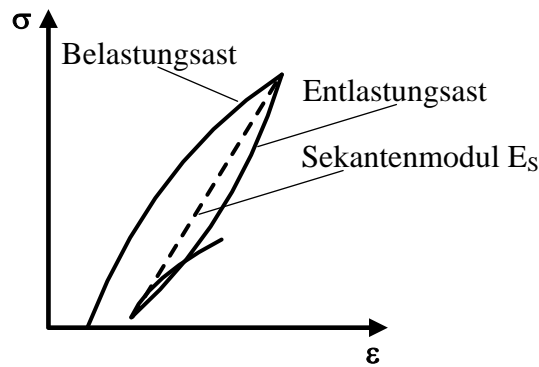


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung des im Entlastungsast ermittelten Sekantenmoduls

Die Auswertung des Sekantenmoduls für sämtliche Lastwechsel des Ermüdungsprozesses ergibt die Steifigkeitsentwicklung bzw. -degradation über die Ermüdungsbelastungsdauer bis zum Bruch, wie in Abbildung 2.17 schematisch dargestellt. Diese kann analog zur Dehnungsentwicklung ebenfalls in drei Phasen unterteilt werden [Holmen – 1979], [Petković et al. – 1992], [Do et al. – 1993]. Die Steifigkeitsdegradation wird in verschiedenen Veröffentlichungen in Zusammenhang mit der Entstehung und Akkumulation von Schädigung gebracht, sowie als möglicher Indikator für das Ermüdungsversagen diskutiert (z. B. [Lohaus et al. – 2007], [Pfanner – 2003]).

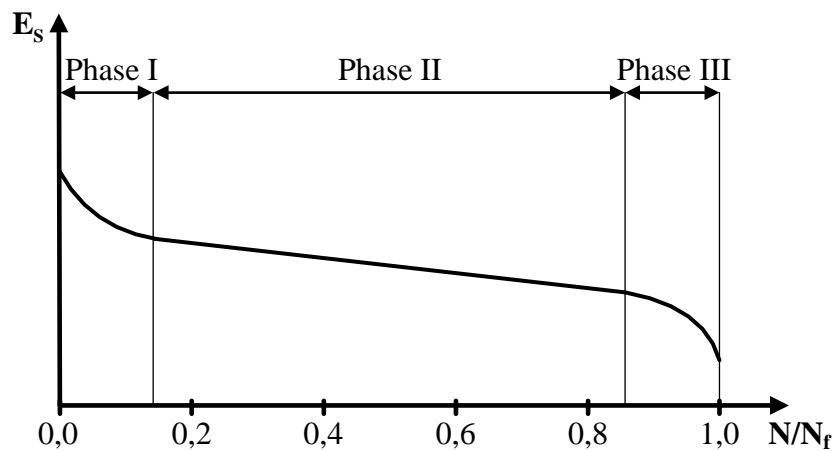


Abbildung 2.17: Steifigkeitsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung (schematisch)

Die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung im Ermüdungsprozess charakterisieren das Materialverhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung. Dieses Materialverhalten ist zu jedem Zeitpunkt abhängig von der vorangegangenen Lastgeschichte, so [Petković et al. – 1992].

Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit

In der Literatur sind folgende Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit von Betonen im Einstufen-Versuch dokumentiert (vgl. auch [Marx et al. – 2013]):

- Betonfestigkeit
- Belastungsniveau
- Belastungsfrequenz
- Umgebungsbedingungen bei Probenlagerung und Prüfung
- Last-Zeit-Funktion der zyklischen Beanspruchung
- Wärmebehandlung
- Verwendung von Fasern

Es wurde bereits zuvor erläutert, dass es keine normativen Vorgaben zur Durchführung von Ermüdungsversuchen an Betonen gibt. Dementsprechend unterscheiden sich die in der Literatur dokumentierten Untersuchungen z. B. hinsichtlich der verwendeten Probekörpergeometrie, der Lasteinleitungsrandbedingungen, der Probenlagerung, des Probenalters und der Art der Lastaufbringung. Neben diesen Randbedingungen unterscheiden sich die Untersuchungen zusätzlich in der Art der Belastung, d. h. in der bezogenen Ober- und Unterspannung bzw. der Beanspruchungsamplitude und in der Belastungsfrequenz.

Im Allgemeinen wird zwar davon ausgegangen, dass die Bruchlastwechselzahlen unabhängig von der Probekörpergeometrie, den Lagerungsbedingungen, dem Betonalter und der Betonfeuchtigkeit bei Prüfung sind, wenn die Festigkeit identischer Probekörper als Bezugsgröße für die Berechnung der Beanspruchungsniveaus verwendet wird [Hsu – 1981]. Dies konnte jedoch bisher nicht für alle Einflussfaktoren nachgewiesen werden. Aufgrund der vielfältigen Einflüsse und der fehlenden normativen Regelungen sind Vergleiche mit in der Literatur dokumentierten Ergebnissen oft schwer möglich.

Last-Zeit-Funktion, Belastungsfrequenzen und Belastungsgeschwindigkeiten

In Abbildung 2.18 sind die Kraft- und Geschwindigkeitsverläufe für sinusförmige, dreiecksförmige und rechteckförmige Last-Zeit-Funktionen (im Folgenden „Wellenform“ genannt dargestellt).

Bei sinusförmiger Belastung verläuft die Belastungsgeschwindigkeit im Lastwechsel, als erste Ableitung der Last-Zeit-Funktion, cosinusförmig. Somit wird die höchste Belastungsgeschwindigkeit beim Durchlaufen der Mittellast erreicht. Beim Erreichen der Ober- bzw. Unterlast ist die Belastungsgeschwindigkeit dagegen Null. Dementsprechend sind die extremen

Beanspruchungen von relativ langer zeitlicher Dauer pro Lastwechsel, während mittlere Beanspruchungen nur kurzzeitig wirken.

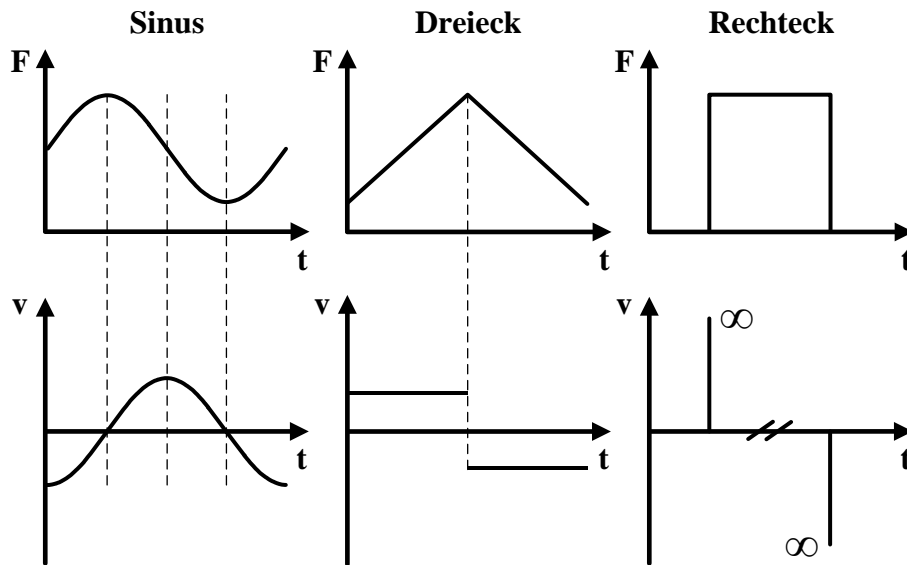


Abbildung 2.18: Verlauf von Belastung und Geschwindigkeit bei verschiedenen Wellenformen

Die dreiecksförmige Belastung stellt einen Sonderfall dar, da die Belastungsgeschwindigkeit im Be- und Entlastungsast jeweils konstant ist. Der Belastungsast entspricht somit hinsichtlich des Geschwindigkeitsverlaufs dem bei monoton steigender Beanspruchung.

Bei rechteckiger Wellenform wird die Last in einem extrem kurzen Zeitraum gesteigert und verringert. Die Geschwindigkeit ist zu diesem Zeitpunkt daher, idealisiert betrachtet, unendlich groß. Dazwischen gibt es jeweils einen längeren Bereich mit konstanter Last, der an Dauerstandsbeanspruchungen erinnert.

2.2.2 Normung im Bereich Betonermüdung

Der Ermüdungsnachweis wird im Bereich des Stahlbeton- und Spannbetonbaus getrennt für die Betonstahlbewehrung, den Spannstahl und den Beton geführt. Der Ermüdungsnachweis für Beton gliedert lässt sich dabei im Allgemeinen in Nachweisstufen gliedern, deren Genauigkeit mit steigender Stufe ansteigt. In Eurocode 2, Teil 1-1 Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau [DIN EN 1992-1-1 – 2011] mit [DIN EN 1992-1-1/NA – 2013] sind lediglich Nachweise der Stufen 1 und 2 enthalten. Eurocode 2, Teil 2 Betonbrücken [DIN EN 1992-2 – 2010] mit [DIN EN 1992-2/NA – 2013] enthält einen Nachweis der Stufe 3. Dagegen enthalten Model Code 90 [CEB/FIP – 1993] und Model Code 2010 [fib – 2013] drei Stufen der Nachweisführung.

Struktur des Ermüdungsnachweises

In der ersten Nachweisstufe wird der Nachweis unter Berücksichtigung einer festgelegten Einwirkungskombination gegen einen anhand der Wöhlerkurven für eine bestimmte Lastwechselzahl abgeleiteten Grenzwert der Beanspruchung geführt, ohne die einwirkende zyklische Beanspruchung im Detail zu berücksichtigen (vereinfachter Nachweis) [CEB/FIP – 1993], [fib – 2013], [DIN EN 1992-1-1 – 2011].

Kann dieser Grenzwert nicht eingehalten werden, wird in Stufe 2 nach Model Code 90 [CEB/FIP – 1993] bzw. Model Code 2010 [fib – 2013] ein Nachweis unter Berücksichtigung der maßgebenden ermüdungswirksamen Belastung (Einstufen-Kollektiv) geführt. Hierbei erfolgt der Nachweis über die Einhaltung eines Grenzwerts der Lastwechselzahl.

In Eurocode 2, Teil 1-1 Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau [DIN EN 1992-1-1 – 2011] wird der Ermüdungsnachweis der Stufe 2 für eine Lastwechselzahl $N = 10^6$ über den Vergleich schädigungsäquivalenter Spannungen mit einem anhand der Wöhlerkurven abgeleiteten Grenzwert der Beanspruchung geführt.

In der dritten Stufe wird ein genauer Nachweis unter Berücksichtigung der auftretenden Beanspruchungskollektive durchgeführt. Dabei wird die lineare Schadensakkumulationshypothese nach *Palmgren* und *Miner* angewandt. Die Schädigungssumme D berechnet sich dabei aus der Summe der beanspruchungskollektivweise ausgewerteten Quotienten aus einwirkender Lastwechselzahl und Bruchlastwechselzahl, die durch die Wöhlerkurven vorgegeben ist [CEB/FIP – 1993], [fib – 2013], [DIN EN 1992-2 – 2010].

Für den Ermüdungsnachweis von Beton nach Model Code 90 [CEB/FIP – 1993] bzw. Model Code 2010 [fib – 2013] sowie nach Eurocode 2 [DIN EN 1992-1-1 – 2011], [DIN EN 1992-2 – 2010] werden zu Beschreibung des Materialwiderstands von Beton im Wesentlichen zwei Komponenten berücksichtigt. Normseitig sind die Wöhlerkurven vorgegeben, die die ertragbaren Bruchlastwechselzahlen in Abhängigkeit von der bezogenen Ober- und Unterspannungen beschreiben. Als zweite Komponente muss der Bemessungswert der Druckfestigkeit des Betons unter Ermüdungsbeanspruchung $f_{cd,fat}$ bestimmt werden. Dieser berechnet sich aus dem Bemessungswert der Druckfestigkeit multipliziert mit einem festigkeitsabhängigen Abminderungsterm. Im Folgenden wird lediglich auf die Wöhlerkurven näher eingegangen, da diese später zum Vergleich mit den eigenen Versuchsergebnissen herangezogen werden.

Wöhlerkurven

Die Wöhlerkurven nach Model Code 90 wurden basierend auf Versuchen an einem normalfesten und einem hochfesten Normalbeton bzw. an einem hochfesten Leichtbeton entwickelt, die bei Prüffrequenzen von $f_p = 1,0$ Hz durchgeführt wurden [Petković – 1991], [Petković et al. – 1992]. Die Wöhlerkurven wurden als Mittelwertkurven abgeleitet [Petković et al. – 1990].

Aufbauend auf Versuchen an normalfesten, hochfesten und ultra-hochfesten Betonen wurden von [Wefer – 2010] und [Lohaus et al. – 2012] neue Wöhlerkurven entwickelt, die im Model Code 2010 enthalten sind. Diese Kurven weisen gegenüber denen nach Model Code 90 drei wesentliche Vorteile auf: Sie sind für normalfeste bis ultra-hochfeste Betone anwendbar, basieren auf einer größeren experimentellen Datenbasis (siehe auch [fib – 2013a]) und stellen eine stetige Beschreibung der Wöhlerkurven dar. Die in Model Code 90 und Model Code 2010 enthaltenen Wöhlerkurven gelten für Ermüdungsbeanspruchungen mit Belastungsfrequenzen $f > 0,1$ Hz und Oberspannungen $S_O < 0,90$. Eine Differenzierung für verschiedene Belastungsfrequenzen ist nicht enthalten. Während die Anwendung des Model Code 90 auf Festigkeitsklassen bis einschließlich C80/95 beschränkt ist, berücksichtigt Model Code 2010 Betone mit Festigkeiten bis einschließlich der Festigkeitsklasse C120/140.

Wöhlerkurven nach Model Code 90 [CEB/FIP – 1993]:

$$\log N_1 = (12 + 16 S_{c,\min} + 8 S_{c,\min}^2) \cdot (1 - S_{c,\max}) \quad (2.5)$$

$$\log N_2 = 0,2 \cdot \log N_1 \cdot (\log N_1 - 1) \quad (2.6)$$

$$\log N_3 = \log N_2 \cdot (0,3 - 0,375 \cdot S_{c,\min}) / \Delta S_c \quad (2.7)$$

Wenn $\log N_1 \leq 6$, dann ist $\log N = \log N_1$.

Wenn $\log N_1 > 6$ und $\Delta S_c \geq 0,3 - 0,375 \cdot S_{c,\min}$ dann ist $\log N = \log N_2$.

Wenn $\log N_1 > 6$ und $\Delta S_c < 0,3 - 0,375 \cdot S_{c,\min}$ dann ist $\log N = \log N_3$.

$$f_{ck,\text{fat}} = 0,85 \cdot \beta_{cc}(t) \cdot f_{ck} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (2.8)$$

Mit: $S_{c,\max} = \frac{\sigma_{c,\max}}{f_{ck,\text{fat}}}$ Bezogene Oberspannung

$S_{c,\min} = \frac{\sigma_{c,\min}}{f_{ck,\text{fat}}}$ Bezogene Unterspannung

$\Delta S_c = S_{c,\max} - S_{c,\min}$ Bezogene Doppelspannungsamplitude

$f_{ck,\text{fat}}$ Charakteristische Druckfestigkeit von Beton bei Ermüdungsbeanspruchung

Wöhlerkurven nach Model Code 2010 [fib – 2013]:

$$\log N_1 = \frac{8}{(Y-1)} \cdot (S_{c,\max} - 1) \quad (2.9)$$

$$\log N_2 = 8 + \frac{8 \cdot \ln(10)}{(Y-1)} \cdot (Y - S_{c,\min}) \cdot \log \left(\frac{S_{c,\max} - S_{c,\min}}{Y - S_{c,\min}} \right) \quad (2.10)$$

$$Y = \frac{0,45 + 1,8 \cdot S_{c,\min}}{1 + 1,8 \cdot S_{c,\min} - 0,3 \cdot S_{c,\min}^2} \quad (2.11)$$

$$f_{ck,\text{fat}} = 0,85 \cdot \beta_{cc}(t) \cdot f_{ck} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{400} \right) \quad (2.12)$$

Wenn $\log N_1 \leq 8$, dann ist $\log N = \log N_1$.

Wenn $\log N_1 > 8$, dann ist $\log N = \log N_2$.

mit: $S_{c,\max} = \frac{\sigma_{c,\max}}{f_{ck,\text{fat}}}$ Bezogene Oberspannung

$S_{c,\min} = \frac{\sigma_{c,\min}}{f_{ck,\text{fat}}}$ Bezogene Unterspannung

$f_{ck,\text{fat}}$ Charakteristische Druckfestigkeit von Beton bei Ermüdungsbeanspruchung

Eurocode 2 [DIN EN 1992-1-1 – 2011], [DIN EN 1992-2 – 2010] enthält ebenfalls stetig beschriebene Wöhlerkurven. Anders als im Model Code sind keine Anwendungsbeschränkungen hinsichtlich der Beanspruchungsniveaus und der Belastungsfrequenzen angegeben. Der nationale, deutsche Anhang beschränkt die Anwendbarkeit von Eurocode 2, Teil 2 Betonbrücken auf eine maximale Festigkeitsklasse des Betons von C50/60 [DIN EN 1992-2/NA – 2013].

Wöhlerkurven nach Eurocode 2 [DIN EN 1992-1-1 – 2011], [DIN EN 1992-2 – 2010]:
(mit charakteristischen Werten angegeben)

$$\log N_i = 14 \cdot \frac{1 - E_{c,\max,i}}{\sqrt{1 - R_i}} \quad (2.13)$$

$$f_{ck,\text{fat}} = k_1 \cdot \beta_{cc}(t_0) \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{ck} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \quad (2.14)$$

mit:	$E_{c,max,i} = \frac{\sigma_{c,max,i}}{f_{ck,fat}}$	Bezogene Oberspannung
	$E_{c,min,i} = \frac{\sigma_{c,min,i}}{f_{ck,fat}}$	Bezogene Unterspannung
	$R_i = \frac{E_{c,min,i}}{E_{c,max,i}}$	Spannungsverhältnis
	$f_{ck,fat}$	Charakteristische Druckfestigkeit von Beton bei Ermüdungsbeanspruchung
	$k_1 = 1,0$	Beiwert; Wert nach nationalem Anhang
	$\alpha_{cc} = 0,85$	Beiwert zur Berücksichtigung von Langezeitauswirkungen auf die Druckfestigkeit; Wert nach nationalem Anhang

Die (aktuellen) Wöhlerkurven nach Model Code 2010 und Eurocode 2 sind in Abbildung 2.19 beispielhaft für fünf Unterspannungsniveaus dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Kurven nach Eurocode 2 größtenteils zu kleineren ertragbaren Bruchlastwechselzahlen führen als die Kurven nach Model Code 2010.

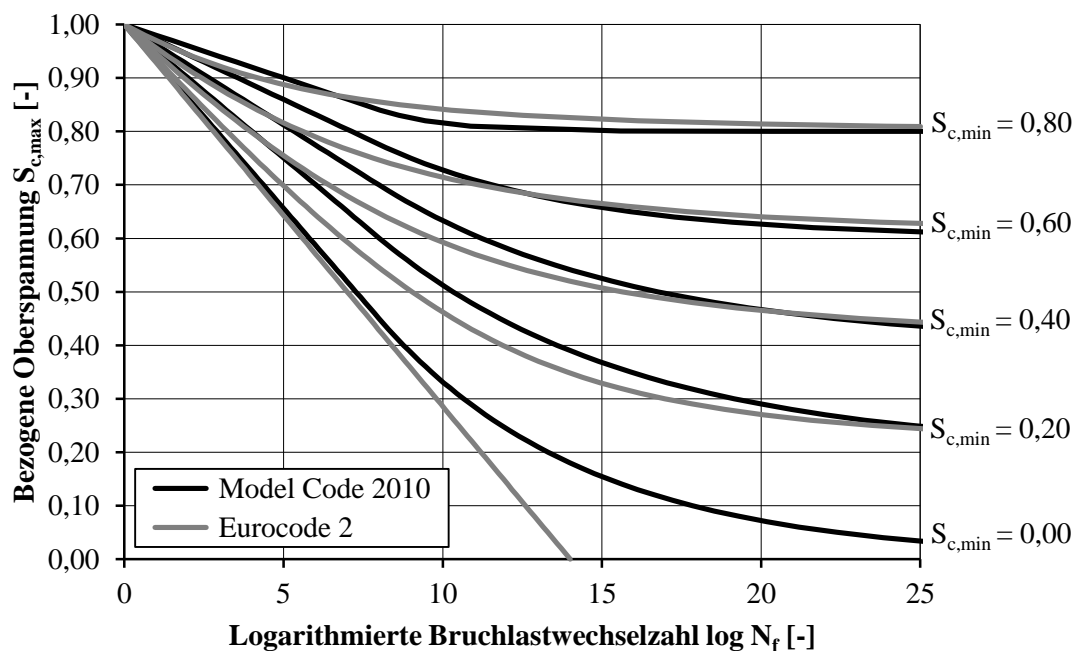


Abbildung 2.19: Wöhlerkurven nach [fib – 2013] und [DIN EN 1992-1-1 – 2011], [DIN EN 1992-2 – 2010]

2.2.3 Einfluss der bezogenen Oberspannung

Sowohl die bezogene Oberspannung als auch die bezogene Unterspannung beeinflussen die Bruchlastwechselzahlen von Beton (vgl. z. B. [Klausen – 1978], [Reinhardt et al. – 1978], [Petković et al. – 1992]). Die Wöhlerlinien werden durch die Ermittlung der Bruchlastwechselzahlen für verschiedene bezogene Oberspannungen erstellt. Dementsprechend ist die Variation der Oberspannung in den meisten in der Literatur dokumentierten Untersuchungen obligatorisch. Bei gleich bleibender bezogener Unterspannung S_U sind die Bruchlastwechselzahlen umso höher, je kleiner die bezogene Oberspannung ist (vgl. Abbildung 2.12 bzw. Abbildung 2.19). Dieser grundsätzliche Zusammenhang ist immer gültig, unabhängig von anderen Einflüssen, wie z. B. der Belastungsfrequenz. Der Anstieg der Bruchlastwechselzahlen bei kleiner werdender bezogener Oberspannung kann jedoch bei Überlagerung mit anderen Einflüssen unterschiedlich ausgeprägt sein, vgl. z. B. [Sparks / Menzies – 1973].

[Holmen – 1979] untersuchte einen normalfesten Beton ($f_{c,28d} \approx 40 \text{ N/mm}^2$) unter zyklischer Beanspruchung ($S_O = 0,95 - 0,60$; $S_U = 0,05$; $f_P = 1,0, 5,0, 10,0 \text{ Hz}$). Für niedrige Oberspannungen, hohe Bruchlastwechselzahlen und lange Versuchsdauern von mehr als „ein paar Stunden“ stellt [Holmen – 1979] einen Kriecheinfluss dahin gehend fest, dass die Dehnungsentwicklungen, dargestellt über der bezogenen Lastwechselzahl, steiler verlaufen und die Dehnungen größer sind. Dagegen zeigen die kurzen Versuche mit höchstens „ein paar Stunden“ Dauer, dass die Dehnungsentwicklungen unabhängig von den Bruchlastwechselzahlen zu sein scheinen.

[Holmen – 1979] stellt insgesamt eine Abhängigkeit der Dehnungsentwicklungen von der bezogenen Oberspannung fest. Der Dehnungszuwachs in der ersten Phase der Dehnungsentwicklung verkleinert sich mit steigender bezogener Oberspannung, sodass sich der im ersten Lastwechsel für verschiedene bezogene Oberspannungen vorhandene Dehnungsunterschied bis zu einer bezogenen Lastwechselzahl von $N/N_f = 0,10$ reduziert. [Holmen – 1979] resümiert, dass die Längsdehnung zur Beschreibung des Materialverhaltens unter Ermüdungsbeanspruchung geeignet sei. Darüber hinaus vermutet er, dass eine Vorhersage der Bruchlastwechselzahl mit Hilfe der Dehnungsentwicklung bei Oberspannung möglich sein könnte.

[Holmen – 1979] beschreibt weiterhin, dass die auf den Ausgangswert bezogene prozentuale Abnahme des Sekantenmoduls umso kleiner ist, je größer die bezogene Oberspannung ist (vgl. Abbildung 2.20). Der prozentuale Endwert des Sekantenmoduls kurz vor dem Versagen sei jedoch mit 60 % des Ausgangswertes weitestgehend unabhängig vom Oberspannungsniveau, so [Holmen – 1979].

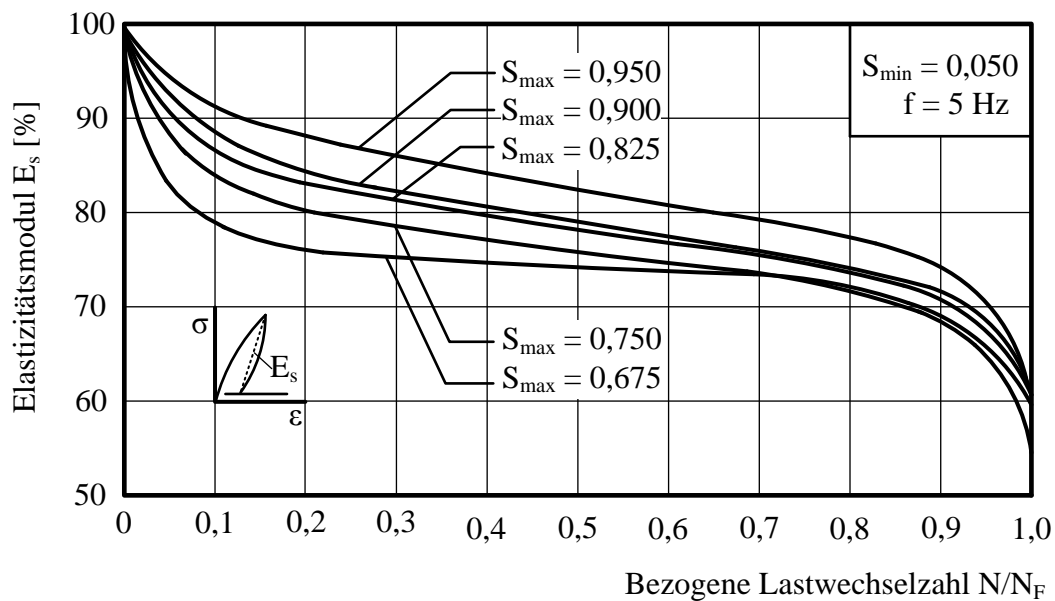


Abbildung 2.20: Verlauf der prozentualen Steifigkeitsabnahme [Holmen – 1979]

[Do et al. – 1993] stellen in ihren Untersuchungen an zwei hochfesten Betonen ($f_{c,28d} \approx 70 \text{ N/mm}^2$ und $f_{c,28d} \approx 95 \text{ N/mm}^2$; $S_O = 0,95, 0,85, 0,75, 0,70$; $S_U = 0,05$; $f_P = 1,0 \text{ Hz}$) relativ kleine Unterschiede der Bruchdehnungen fest ($3,0\text{‰} - 3,5\text{‰}$ bzw. $2,8\text{‰} - 3,0\text{‰}$). Die in ihren Versuchen ermittelten prozentualen Endwerte der Steifigkeiten liegen in Bereichen von $75\% - 85\%$ bzw. $85\% - 95\%$. Damit zeigen diese Untersuchungen größere prozentuale Endwerte der Steifigkeiten als sie von [Holmen – 1979] festgestellt wurden. [Do et al. – 1993] stellen darüber hinaus einen linearen Zusammenhang zwischen dem logarithmierten Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl fest.

In [Awad / Hilsdorf – 1971], [Awad / Hilsdorf – 1972] wird über zyklische Untersuchungen mit dreiecksförmiger Wellenform an einem normalfesten Beton berichtet ($f_{c,28d} \approx 28 \text{ N/mm}^2$; $S_O = 0,95 - 0,80$; $\Delta S = S_O - S_U = 0,05$ bis S_O ; $\dot{\sigma} = 0,07 - 6,9 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Anders als [Holmen – 1979] stellen [Awad / Hilsdorf – 1971] fest, dass sich auch bei gleichen, hohen Ober Spannungsniveaus größere Dehnungen im letzten Lastwechsel für längere Versuchsdauern ergeben. Bei niedrigeren bezogenen Ober Spannungsniveaus sind die Dehnungen im letzten Lastwechsel, wie bei [Holmen – 1979], ebenfalls größer als bei höheren bezogenen Ober Spannungen. Darüber hinaus berichten sie über einen linearen Zusammenhang zwischen der Bruchdehnung und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl.

[Weigler / Rings – 1987] führten unter anderem Druckschwellversuche an einem normalfesten Beton ($f_{c,cube,28d} \approx 35 \text{ N/mm}^2$; $S_O = 0,75, 0,65$; $S_U = 0,05$; $f_P = 1,0 \text{ Hz}$) durch. Sie bezeichnen die zweite Phase der Dehnungsentwicklung als „Sekundäres Kriechen“. In der doppellogarithmischen Darstellung der Steigung in der zweiten Phase über die Dauer der Belastung bis zum Versagen ergibt sich ein linearer Zusammenhang. [Weigler / Rings – 1987] erläutern,

dass die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase zur Abschätzung des Versagenszeitpunktes herangezogen werden kann, und die Steigung in der zweiten Phase somit zum „Bruchkriterium“ wird. Auch [Sparks / Menzies – 1973] stellen einen solchen linearen Zusammenhang fest, allerdings zur Bruchlastwechselzahl ($f_c \approx 30 \text{ N/mm}^2$ (NB); $f_c \approx 20 \text{ N/mm}^2$ (LB); $S_O = 0,70 - 0,90$; $S_U = 0,33$)

In [Petković – 1991] bzw. [Petković et al. – 1992] sind unter anderem Ergebnisse von Ermüdungsversuchen an einem normalfesten und hochfesten Beton ($f_{c,60d} \approx 50 \text{ N/mm}^2$ „ND 65“; $f_{c,93d} \approx 75 \text{ N/mm}^2$ „ND 95“; $S_O = 0,95 - 0,55$; $S_U = 0,05, 0,20, 0,40$; $f_P = 1,0 \text{ Hz}$) dokumentiert. [Petković – 1991] stellt ebenfalls einen linearen Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen fest. Darüber hinaus bezeichnet sie den Übergang zu Phase III als „Grenze der stabilen Dehnung“. [Petković – 1991] sieht zwei Möglichkeiten zur Vorhersage des Ermüdungsversagens anhand der Dehnungsentwicklungen: Einerseits mithilfe des linearen Zusammenhangs zwischen logarithmierter Steigung und logarithmierter Bruchlastwechselzahl und andererseits mithilfe der Anfangsdehnung, der Bruchdehnung und der Steigung in der zweiten Phase.

Hinsichtlich des Einflusses der Oberspannung auf die als Sekantenmodul ermittelte Steifigkeit stellen [Petković et al. – 1992] für den untersuchten hochfesten Beton fest, dass die Größe des Sekantenmoduls unter Ermüdungsbelastung abhängig von der Mittelspannung und der Amplitude ist. In [Petković – 1991] wird beschrieben, dass die Abnahme des Sekantenmoduls im Ermüdungsprozess umso kleiner ist, je kleiner die Oberspannung und die Amplitude sind, was im Widerspruch zu den Ergebnissen von [Holmen – 1979] steht (vgl. Abbildung 2.20).

[Diaz / Hilsdorf – 1971] führten zyklische Versuche an einem normalfesten Beton bei zwei hohen bezogenen Oberspannungen und niedriger Belastungsfrequenz durch ($f_{c,28d} \approx 23 \text{ N/mm}^2$; $S_O = 0,95, 0,85$; $S_U \approx 0$; $f_P \approx 0,02 \text{ Hz}$). Sie berichten, dass die anfängliche Rissentstehung vom Oberspannungsniveau abhängig ist. Anschließend entstehen hauptsächlich Risse in der Kontaktzone. Im Bereich $N/N_f > 0,80$ breiten sich die Risse zwischen den Kontaktzonen aus und verbinden sich. Damit bestehen bei Ermüdungsbeanspruchung ähnliche Charakteristiken des Risswachstums wie bei monoton steigender Beanspruchung (vgl. Abschnitt 2.1.1).

[Shah / Chandra – 1970] untersuchten die Rissentstehung und Fortpflanzung bei zyklischer, dreiecksförmiger Belastung bei ebenfalls sehr niedrigen Belastungsfrequenzen ($S_O = 0,90 - 0,60$; $S_U = 0,10$; $f_P = 0,07 - 0,1 \text{ Hz}$). Für Beanspruchungsniveaus $S_O \leq 0,70$, bei denen kein Versagen eintrat, stellen sie ein sehr stabiles und langsames Risswachstum fest. Dagegen beschreiben sie für höhere Beanspruchungen ein schnelles Risswachstum.

2.2.4 Einfluss der Betondruckfestigkeit

In Abschnitt 2.1.2 wurde beschrieben, dass bei höherfesten Betonen infolge der veränderten Gefügestruktur im Vergleich zu normalfesten Betonen nicht nur die Betondruckfestigkeit, sondern auch das Materialverhalten unter monoton steigender Druckbeanspruchung in Form der einaxialen Spannungs-Dehnungslinie beeinflusst wird. Hinsichtlich Druckschwellbeanspruchung stellt sich somit die Frage, inwieweit sich die unterschiedliche Gefügestruktur hochfester Betone zum einen auf die Ermüdungsfestigkeit in Form der Bruchlastwechselzahlen und zum anderen auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung auswirkt.

Der überwiegende Teil der in der Literatur dokumentierten Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Betonen wurde an normalfesten Betonen durchgeführt [Awad / Hilsdorf – 1971], [Sparks / Menzies – 1973], [Klausen – 1978], [Reinhardt et al. – 1978], [Holmen – 1979]. Wie bereits zuvor erläutert, werden die Ermüdungsbeanspruchungen im Allgemeinen als auf die Druckfestigkeit bezogene Beanspruchungen angegeben. Vergleiche von Betonen verschiedener Festigkeiten erfolgen somit bei jeweils gleichem bezogenem Beanspruchungsniveau.

Die Untersuchungen von [Kim / Kim – 1996] an Betonen mit vier unterschiedlichen Festigkeiten von $f_{c,29d} = 26 \text{ N/mm}^2$, 52 N/mm^2 , 84 N/mm^2 und 103 N/mm^2 ($S_O = 0,95, 0,85, 0,80, 0,75$; $S_U = 0,25$; $f_P = 1,0 \text{ Hz}$) zeigen, dass die Bruchlastwechselzahlen mit ansteigender Festigkeit abnehmen. Dagegen berichten [Kono et al. – 2008] über kraftgeregelte Versuche an drei hochfesten Betonen ($f_c = 100 \text{ N/mm}^2$, 130 N/mm^2 , 170 N/mm^2) im Low-Cycle-Fatigue ($S_O = 0,90, 0,80, 0,70$; $S_U = 0,1$; $f_P = 0,2 - 0,5 \text{ Hz}$), bei denen die Ermüdungsfestigkeit mit zunehmender Druckfestigkeit der Betone anstieg.

[Petković et al. – 1992] untersuchten unter anderem einen normalfesten und einen hochfesten Normalbeton ($f_{c,60d} \approx 50 \text{ N/mm}^2$ „ND 65“; $f_{c,93d} \approx 75 \text{ N/mm}^2$ „ND 95“; $S_O = 0,95 - 0,55$; $S_U = 0,05, 0,20, 0,40$; $f_P = 1,0 \text{ Hz}$). Hinsichtlich der erreichten Bruchlastwechselzahlen können sie jedoch keine signifikanten Unterschiede feststellen. Für die Ableitung von Wöhlerkurven betrachten sie daher auch die Betone verschiedener Festigkeiten gemeinsam. In Abbildung 2.21 sind die Ergebnisse von [Petković et al. – 1992] für die beiden bezogenen Unterspannungen $S_U = 0,05$ und $S_U = 0,40$ dargestellt.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt [Hohberg – 2004], der Druckschwelluntersuchungen an Betonen der Festigkeitsklassen B25, B45 und B95 durchführte und vergleichend auswertete ($S_O = 0,87 - 0,60$; $\sigma_U = 2 \text{ N/mm}^2$; $f_P = 0,1, 1,0, 5,0, 10,0 \text{ Hz}$). In [Do et al. – 1993] wird über Ermüdungsversuche unter Druckschwellbeanspruchung an zwei hochfesten Betonen mit Druckfestigkeiten von $f_{c,28d} \approx 70 \text{ N/mm}^2$ und $f_{c,28d} \approx 95 \text{ N/mm}^2$ berichtet ($S_O = 0,95, 0,85, 0,75, 0,70$; $S_U = 0,05$; $f_P = 1,0 \text{ Hz}$). Der Vergleich der Bruchlastwechselzahlen dieser beiden hochfesten Betone zeigt ebenfalls keine signifikanten Unterschiede.

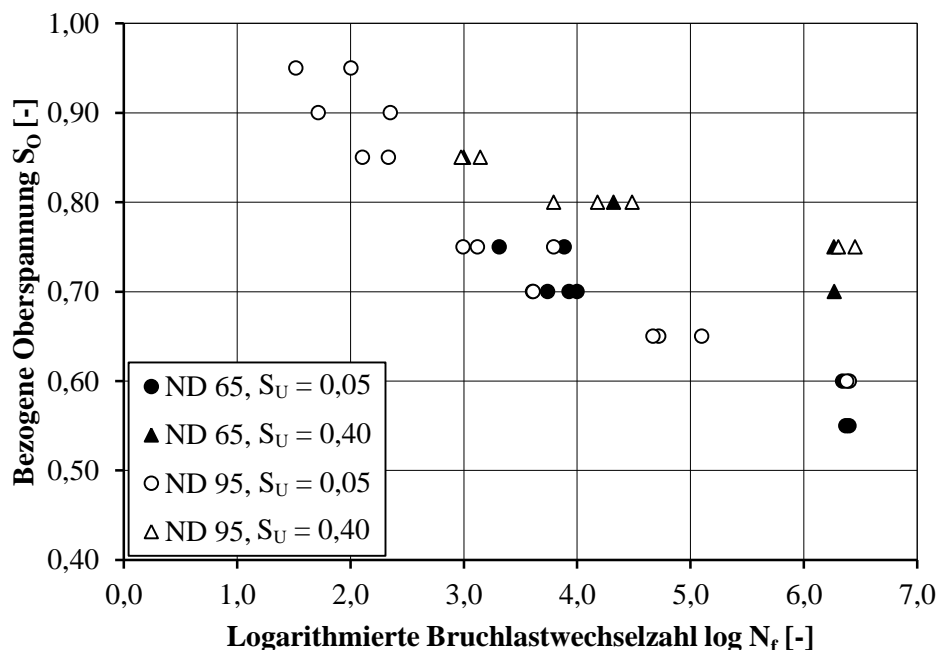


Abbildung 2.21: Bruchlastwechselzahlen nach [Petković et al. – 1992] für einen normalfesten und einen hochfesten Normalbeton für $S_U = 0,05$ und $S_U = 0,40$

Die Dehnungsentwicklungen hochfester Betone zeigen, ähnlich wie die normalfester Betone, dreiphasige Verläufe [König et al. – 2001]. Für hochfeste Betone wurde jedoch festgestellt, dass die zweite Phase länger ist als bei Betonen niedrigerer Festigkeit [Petković et al. – 1992], [Kim / Kim – 1996]. [Zhao et al. – 1996] geben die Phasenübergänge für den von ihnen untersuchten hochfesten Beton mit 10 % und 85 % an ($S_0 = 0,80 - 0,65$; $S_U = 0,10$; $f_P = 10,0$ Hz). [Medeiros et al. – 2013] können Phasenübergänge bei im Mittel 13 % und 75 % der Ermüdungsdauer für einen hochfesten Beton entnommen werden ($S_0 = 0,85$; $S_U = 0,26$; $f_P = 0,0625, 0,25, 1,0, 4,0$ Hz). Untersuchungen von [Wefer – 2010] an einem ultrahochfesten Beton mit Fasern zeigten ($S_0 = 0,90 - 0,60$; $S_U = 0,05, 0,20, 0,40$; $f_P = 10,0$ Hz), dass die Phasenübergänge bei 5 % und 95 % der Bruchlastwechselzahl eintraten. Die erste und dritte Phase waren somit kürzer als bei normalfesten Betonen

[Petković et al. – 1992] werten zusätzlich die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase über der bezogenen Lastwechselzahl N/N_f aus und stellen fest, dass diese für hochfeste Betone kleiner als für normalfeste Betone ist. Dieses Ergebnis wird sowohl von [Kim / Kim – 1996] als auch von [Do et al. – 1993] bestätigt. Sowohl [Do et al. – 1993] als auch [Kim / Kim – 1996] berichten zudem, dass die Bruchdehnungen bei normalfesten Betonen größer sind als bei höherfesten Betonen. [Kim / Kim – 1996] weisen ergänzend darauf hin, dass höherfeste Betone bei gleichem Beanspruchungsniveau eine größere Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase zeigen, wenn die über der absoluten Lastwechselzahl N aufgetragenen Dehnungsentwicklungen verglichen werden (vgl. Abbildung 2.22).

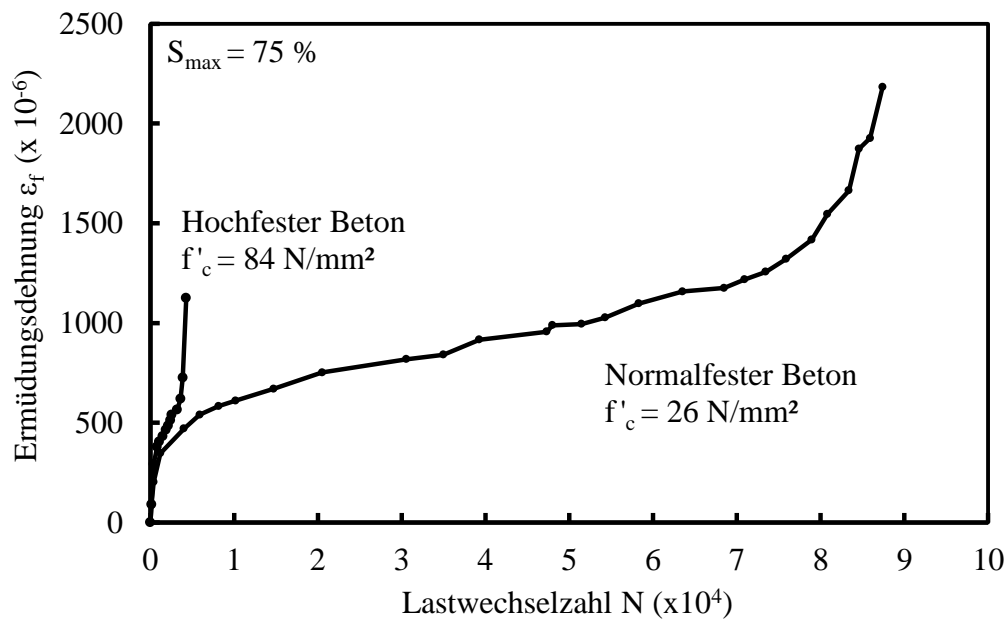


Abbildung 2.22: Dehnungsentwicklung für normalfesten und hochfesten Beton
[Kim / Kim – 1996]

[Do et al. – 1993] ermitteln die Steifigkeit wie [Holmen – 1979] als Sekantenmodul des Entlastungsasts zwischen Ober- und Unterspannung. Auch dieser zeigt einen dreiphasigen Verlauf, ähnlich dem der Dehnungsentwicklung. Die Phasenunterteilungen werden bei 20 % und 80 % angegeben. Dabei erreichte der Beton mit der niedrigeren Festigkeit ($f_{c,28d} \approx 70 \text{ N/mm}^2$) einen Sekantenmodul beim Versagen von 75 %–85 % und der höherfestere Beton ($f_{c,28d} \approx 95 \text{ N/mm}^2$) einen Sekantenmodul im Bereich von 85 %–95 % des Sekantenmoduls im zweiten Lastwechsel. Bei gleicher Bruchlastwechselzahl war der Steifigkeitsverlust für den Beton mit der niedrigeren Festigkeit größer.

2.2.5 Einfluss der Belastungsfrequenz

Im Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit von Beton wird häufig der Einfluss der Belastungsfrequenz untersucht. Deutlich weniger Untersuchungen betrachten explizit den Einfluss von Belastungsgeschwindigkeiten. Im Folgenden werden Literaturstellen ausgewertet, die sich mit dem Einfluss der Belastungsfrequenz und der Belastungsgeschwindigkeit auf das Ermüdungsverhalten von Betonen unter Druckschwellbeanspruchung beschäftigen.

[Weigler / Freitag – 1975] führten Druckschwellversuche an einem Leichtbeton ($f_{c,28d} \approx 38 \text{ N/mm}^2$; $S_O = 0,882 - 0,537$; $S_U = 0,05, 0,20, 0,40$; $f_p = 1,0, 10,0, 200,0 \text{ Hz}$) durch. Sie stellen für den Bereich $S_O > 0,80$ einen Frequenzeinfluss dahingehend fest, dass die Bruchlastwechselzahlen mit steigender Frequenz zunehmen. Die Ursache für diesen Frequenzeinfluss wird von [Weigler / Freitag – 1975] für hohe bezogene Oberspannungen in der unterschiedlichen Länge der Standzeit bei kritischen Oberspannungen im Bereich oberhalb der

Dauerstandfestigkeit gesehen. Für den Bereich $S_O < 0,80$ wurde kein Frequenzeinfluss festgestellt, sodass [Weigler / Freitag – 1975] davon ausgehen, dass die Dauer der Standzeit hier keinen Einfluss auf die Bruchlastwechselzahlen hat. Die Begrenzung des Einflusses der Belastungsfrequenz auf bezogene Oberspannungen $S_O > 0,80$ wird auf die Dauerstandfestigkeit von Beton zurückgeführt, die ebenfalls in diesem Beanspruchungsbereich liegt.

[Klausen – 1978] führte Versuche mit Druckschwellbeanspruchungen an einem normalfesten Beton ($f_{c,28d} \approx 44 \text{ N/mm}^2$; $S_U = 0,05, 0,20, 0,35, 0,40$; $\Delta S = 0,34 - 0,80$; $f_P = 1,0, 10,0$ und $200,0 \text{ Hz}$) durch. Für bezogene Oberspannungen $S_O < 0,80$ kann [Klausen – 1978] keinen Frequenzeinfluss feststellen. Wie [Weigler / Freitag – 1975] vermutet auch [Klausen – 1978] als Ursache für den Frequenzeinfluss, die Länge der Standzeit bei hoher Belastung und stellt fest, dass diese für niedrige bezogene Oberspannungen somit keine Auswirkung hat.

[Reinhardt et al. – 1978] führten Druckschwelluntersuchungen an einem normalfesten Beton bei unterschiedlichen bezogenen Unterspannungen durch ($f_{c,28d} \approx 53 \text{ N/mm}^2$; $S_O = 0,875$; $S_U = 0,85 - 0,40$; $f_P = 0,175, 17,5 \text{ Hz}$). In diesen Untersuchungen wurde ebenfalls ein Frequenzeinfluss dahingehend festgestellt, dass die Bruchlastwechselzahlen bei der höheren Frequenz zunahmen. Der Einfluss der Unterspannung war dabei bei der niedrigeren Frequenz kleiner.

Bei den Untersuchungen von [Holmen – 1979] an einem normalfesten Beton ($f_{c,28d} \approx 40 \text{ N/mm}^2$; $S_O = 0,95 - 0,60$; $S_U = 0,05$; $f_P = 1,0, 5,0, 10,0 \text{ Hz}$) zeigte sich, dass eine Erhöhung der Belastungsfrequenz besonders bei hohen bezogenen Oberspannungen zu höheren Bruchlastwechselzahlen führt. [Holmen – 1979] beschreibt, dass die Dehnungsentwicklungen bei Oberspannung aufgetragen über der bezogenen Lastwechselzahl N/N_f nicht von der Belastungsfrequenz beeinflusst werden. Er sieht weiterhin keinen Hinweis auf eine Beeinflussung der Veränderung des Sekantenmoduls im Ermüdungsprozess durch die Belastungsfrequenz. Für den ersten Lastwechsel stellt [Holmen – 1979] fest, dass die Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeiten zu einer Erhöhung der Steifigkeit gegenüber den Versuchen zur Feststellung der Druckfestigkeit führt. Den gleichen Effekt beschreibt auch [Petković – 1991].

[Hohberg – 2004] untersuchte Betone der Festigkeitsklassen B25, B45 und B95 ($S_O = 0,87 - 0,60$; $\sigma_U = 2,0 \text{ N/mm}^2$; $f_P = 0,1, 1,0, 5,0, 10,0, 20,0 \text{ Hz}$). Die zyklische Belastung unterschied sich bei diesen Untersuchungen gegenüber üblichen Ermüdungsversuchen darin, dass im Verlauf der Versuche immer wieder Zwischensequenzen mit dreiecksförmiger Beanspruchung durchgeführt wurden. Die Versuchsergebnisse für den B45 bei $S_O = 0,75$ zeigen, dass die Bruchlastwechselzahlen mit steigender Frequenz höher werden und die Bruchdehnungen mit steigender Frequenz abnehmen. Insgesamt stellt [Hohberg – 2004] fest, dass der Frequenzeinfluss in einem Bereich von $f_P = 0,1 - 10 \text{ Hz}$ wirksam sei. Bei höheren Belastungsfrequenzen seien die Bruchlastwechselzahlen nur noch von der Oberspannung abhängig.

[Medeiros et al. – 2013], [Medeiros – 2012] berichten über Ermüdungsversuche an einem hochfesten Beton ($f_{c,cube100,28d} = 75 \text{ N/mm}^2$; $S_O = 0,85$; $S_U = 0,25$; $f_P = 0,0625, 0,25, 1,0$ und $4,0 \text{ Hz}$). Für höhere Belastungsfrequenzen stellen auch [Medeiros et al. – 2013] ansteigende Bruchlastwechselzahlen fest. [Medeiros – 2012] kann keinen Zusammenhang zwischen dem Dehnungszuwachs in den verschiedenen Phasen der Dehnungsentwicklung und der erreichten Bruchlastwechselzahl feststellen.

In [Sparks / Menzies – 1973] bzw. [Sparks – 1982] sind Versuche mit variierenden Ober Spannungsniveaus dokumentiert ($S_O = 0,90 - 0,70$; $S_U = 0,33$), bei denen die zyklischen Beanspruchungen dreiecksförmig bei zwei konstanten Be- bzw. Entlastungsgeschwindigkeiten von $\dot{\sigma} = 0,5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ und $\dot{\sigma} = 0,50 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ aufgebracht wurden. Untersucht wurden drei verschiedene Betone mit Zuschlägen aus Kies, Kalkstein und einem Leichtzuschlag, die Druckfestigkeiten von $f_{c,28d} \approx 30 \text{ N/mm}^2$ und $f_{c,28d} \approx 20 \text{ N/mm}^2$ aufwiesen.

[Sparks / Menzies – 1973] stellen fest, dass die Bruchlastwechselzahlen bei der höheren Be- und Entlastungsgeschwindigkeit größer sind. Darüber hinaus zeigen ihre Ergebnisse, dass das Maß der Erhöhung der Bruchlastwechselzahlen infolge höherer Belastungsgeschwindigkeiten von der bezogenen Ober Spannung abhängig ist. Die Erhöhung der Bruchlastwechselzahlen ist darüber hinaus geringer als die Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit, weshalb die höhere Belastungsgeschwindigkeit zu einer kürzeren Ermüdungsdauer führt. [Sparks – 1982] erwähnt eine Beeinflussung der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase. Einen Frequenzeinfluss auf den linearen Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl können [Sparks / Menzies – 1973] jedoch nicht feststellen.

In [Sparks – 1982] wird gezeigt, dass sich die für verschiedene Frequenzen ergebenden Bruchlastwechselzahlen im Wöhlerdiagramm gemeinsam beschreiben lassen, wenn die Ober Spannungen auf die Druckfestigkeit bei zur zyklischen Beanspruchung äquivalenter Belastungsgeschwindigkeit bezogen werden. Ähnliche Ergebnisse sind auch von [Schneider et al. – 2012] dokumentiert, deren Auswertungen auf in der Literatur dokumentierten Daten für normalfeste Betone basieren.

[Awad / Hilsdorf – 1971], [Awad / Hilsdorf – 1972] untersuchten einen normalfesten Beton ($f_{c,28d} \approx 28 \text{ N/mm}^2$) unter anderem bei zyklischer Beanspruchung ($S_O = 0,90$; $\Delta S = 0,10, 0,50, 0,90$). Auch hier wurde die zyklische Beanspruchung dreiecksförmig bei drei Belastungsgeschwindigkeiten von umgerechnet $\dot{\sigma} = 0,069 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\dot{\sigma} = 0,69 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ und $\dot{\sigma} = 6,9 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ aufgebracht. Für die drei untersuchten Schwingweiten wurde festgestellt, dass die Bruchlastwechselzahlen mit steigender Belastungsgeschwindigkeit größer werden. Bei niedrigerer Belastungsgeschwindigkeit stellen [Awad / Hilsdorf – 1971] größere Dehnungen über den gesamten Ermüdungsprozess fest, inklusive einer größeren Dehnung beim Versagen.

[Awad / Hilsdorf – 1972] postulieren die Hypothese, dass bei Ermüdungsbeanspruchung unter hohen Ober Spannungen ein zyklischer Effekt, der von dem Spannungsniveau und der Span-

nungsamplitude abhängig ist, und ein zeitlicher Effekt, der von der Wirkungsdauer der Beanspruchung unter einer bestimmten Beanspruchungshöhe abhängig ist, besteht.

2.2.6 Einfluss der Wellenform

In Abschnitt 2.1.3 wurde erläutert, dass die Belastungsgeschwindigkeit einen Einfluss auf das Materialverhalten von Beton unter monoton steigender Beanspruchung hat. Um diesen Einfluss auch für Ermüdungsbeanspruchungen zu untersuchen, sind dreiecksförmige Last-Zeit-Funktionen aufgrund der abschnittsweise konstanten Belastungsgeschwindigkeit besonders geeignet (vgl. Abbildung 2.18). Es stellt sich dann jedoch gleichzeitig die Frage, inwiefern die Wellenform selbst einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten und die Ermüdungsfestigkeit besitzt. In der Literatur sind nur wenige Ermüdungsuntersuchungen dokumentiert, bei denen die zyklische Belastung nicht sinusförmig war, vgl. [Awad / Hilsdorf – 1971], [Sparks / Menzies – 1973], [Gettu et al. – 1993]. Vergleichende Untersuchungen zum Einfluss der Wellenform auf die Ermüdungsfestigkeit von Beton konnten in zwei Literaturstellen gefunden werden.

In [Tepfers et al. – 1973] sind zyklische Versuche mit sinusförmiger, dreiecksförmiger und rechteckförmiger Belastung an prismatischen Probekörpern dokumentiert ($f_{cm} \approx 24 \text{ N/mm}^2$; $S_O = 0,79 - 0,82$; $S_U = 0,13 - 0,14$; $f_P = 5 \text{ Hz}$ bzw. 3 Hz (Rechteck)). Die Versuche wurden sowohl kraftgeregelt als auch verformungsgeregelt durchgeführt. Die zyklische Belastung wurde in bestimmten Abständen unterbrochen und eine Be- und Entlastungs-Phase durchgeführt, um die Verformungen zu messen. Für jede Versuchsart wurde lediglich ein Versuch durchgeführt, was insbesondere für Ermüdungsversuche ein extrem kleiner Stichprobenumfang ist.

[Tepfers et al. – 1973] beschreiben, dass die Bruchlastwechselzahlen im kraftgeregelten Versuch von der rechteckförmigen über die sinusförmige bis zur dreiecksförmigen Belastung ansteigen. Sie beschreiben weiterhin, dass die Dehnungsentwicklungen des dreiecksförmigen und die des sinusförmigen Versuchs relativ nah beieinander liegen, obwohl im sinusförmigen Versuch das Versagen des Probekörpers bei einer kleineren Bruchlastwechselzahl eingetreten ist. Der rechteckförmige Versuch zeigte die am deutlichsten ausgeprägte Dehnungsentwicklung.

[Weigler / Freitag – 1975] führten, ergänzend zu Ermüdungsversuchen mit sinusförmiger Belastung, ebenfalls Versuche mit dreiecksförmiger und rechteckförmiger Belastung an einem normalfesten Leichtbeton durch ($f_{c,28d} \approx 38 \text{ N/mm}^2$; $S_O = 0,882$, $S_O = 0,785$ (Dreieck), $S_O = 0,785$, $S_O = 0,683$ (Rechteck); $S_U = 0,20$; $f_P = 0,1, 10,0 \text{ Hz}$). Wie auch bei [Tepfers et al. – 1973] zeigte sich, dass die Bruchlastwechselzahlen ausgehend von der rechteckförmigen über die sinusförmige zu der dreiecksförmigen Wellenform ansteigen.

Wie bereits zuvor beschrieben, stellen [Weigler / Freitag – 1975] einen Frequenzeinfluss bei sinusförmiger Beanspruchung nur für bezogene Oberspannungen $S_O > 0,80$ fest und führen

diesen auf unterschiedlich lange Belastungsdauern bei hoher Belastung zurück (vgl. Abschnitt 2.2.5). Unter Berücksichtigung dieser These folgern [Weigler / Freitag – 1975] für die Versuche bei verschiedenen Wellenformen, dass die Bruchlastwechselzahl für $S_0 < 0,80$ nicht von der Form der Belastungsfunktion und damit nicht von der Beanspruchungsdauer durch kritische hohe Belastungen abhängig sein kann. Sie vermuten stattdessen, dass die „Lastanstiegs-geschwindigkeit“ ursächlich sein könnte [Weigler / Freitag – 1975]. Die Dehnungen wurden im Rahmen dieser Untersuchungen nicht betrachtet.

2.2.7 Zusammenfassung und Beurteilung

Allgemein

Die Literaturlauswertung zur Druckschwellerermüdung zeigt, dass es nur wenige systematische Untersuchungen zu den Einflüssen auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung von Beton bei Ermüdungsbeanspruchung gibt. Bei den meisten dokumentierten Untersuchungen lag der Fokus auf den Bruchlastwechselzahlen. So sind in der Literatur nur vereinzelt Aussagen zur Beeinflussung der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen zu finden, die sich teilweise auch widersprechen. Falls die Dehnungsentwicklungen betrachtet wurden, beschränkte sich diese Betrachtung zudem meist auf die Dehnungsentwicklungen bei Oberspannung. Zum Ermüdungsverhalten hochfester Betone gibt es im Allgemeinen weit weniger Untersuchungen als zum Ermüdungsverhalten normalfester Betone.

Einfluss der bezogenen Oberspannung

Die Bruchlastwechselzahlen sind für kleinere bezogene Oberspannungen größer. Hinsichtlich der Dehnungsentwicklung gibt es nur wenige Erkenntnisse. Es wird berichtet, dass die Dehnungsentwicklung durch die bezogene Oberspannung beeinflusst wird. In der Literatur ist weiterhin dokumentiert, dass bei kleinen bezogenen Oberspannungen, und damit längeren Versuchsdauern von mehr als „ein paar Stunden“ [Holmen – 1979], Kriechanteile in den gemessenen Betonverformungen enthalten sind. Bei kurzen Versuchen von „ein paar Stunden“ [Holmen – 1979] sei die Dehnungsentwicklung dagegen unabhängig von der Bruchlastwechselzahl.

In einem Teil der dokumentierten Untersuchungen wurde eine Beeinflussung der Bruchdehnung durch hohe bezogene Oberspannungen festgestellt. Teilweise wurden jedoch auch sehr ähnliche Bruchdehnungen ermittelt. Zwischen der logarithmierten Bruchdehnung und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl konnte ein linearer Zusammenhang festgestellt werden. Auch zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Belastungsdauer bzw. der logarithmierten Bruchlastwechselzahl wurden lineare Zusammenhänge festgestellt. Die Dehnung bei Oberspannung wird als zur Beschreibung des Materialverhaltens unter Ermüdungsbeanspruchung heranziehbar bewertet.

Die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase wird darüber hinaus als geeignet für die Abschätzung des Versagenszeitpunktes angesehen.

Die auf den Ausgangswert des Sekantenmoduls bezogene prozentuale Abnahme der Steifigkeit ist für höhere bezogene Oberspannungen weniger stark ausgeprägt, wobei vor dem Versagen ein Endwert erreicht wird, der möglicherweise unabhängig von der Oberspannung ist. Dagegen gibt es auch Ergebnisse, nach denen die Abnahme der Steifigkeit umso kleiner ist, je kleiner die Oberspannung und die Amplitude sind. Ähnlich wie bei der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase wurde auch ein linearer Zusammenhang zwischen dem logarithmierten Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl festgestellt.

Einfluss der Betondruckfestigkeit

Zur Auswirkung höherer Betondruckfestigkeiten auf die Bruchlastwechselzahlen gibt es widersprüchliche Angaben. Es wurden größere, kleinere und gleich bleibende Bruchlastwechselzahlen für höhere Betondruckfestigkeiten ermittelt.

Die Dehnungsentwicklung hochfester Betone ist wie die Dehnungsentwicklung normalfester Betone dreiphasig. Die zweite Phase der Dehnungsentwicklung ist jedoch bei hochfesten Betonen länger als bei normalfesten Betonen. Die erste und letzte Phase sind tendenziell kürzer. Es gibt Hinweise darauf, dass die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase aufgetragen über der bezogenen Lastwechselzahl N/N_f bei höherfesten Betonen kleiner sein könnte als bei normalfesten Betonen. Die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase aufgetragen über der Lastwechselzahl N könnte dagegen bei höherfesten Betonen größer als bei normalfesten Betonen sein.

Die Bruchdehnung unter Ermüdungsbeanspruchung ist bei höherfesten Betonen möglicherweise kleiner als bei normalfesten Betonen. Es gibt Hinweise darauf, dass höherfeste Betone einen weniger stark ausgeprägten Steifigkeitsabfall bis zum Versagen zeigen als normalfeste Betone. Dementsprechend ist der auf den Ausgangswert bezogene prozentuale Endwert des Sekantenmoduls für höherfeste Betone größer.

Die Literaturlauswertung zeigt, dass es wenige Untersuchungen zu dem Einfluss der Betondruckfestigkeit auf die Dehnungsentwicklung unter Druckschwellbeanspruchung gibt. Vor dem Hintergrund des unterschiedlichen Materialverhaltens bei monoton steigender Beanspruchung bzw. vor dem Hintergrund unterschiedlicher Rissentstehung und unterschiedlichem Risswachstum, ist ein unterschiedliches Dehnungsverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung für Betone verschiedener Festigkeiten jedoch sehr wahrscheinlich.

Einfluss der Belastungsfrequenz

Für bezogene Oberspannungen $S_O > 0,75$ führen höhere Belastungsfrequenzen bzw. höhere Belastungsgeschwindigkeiten zu höheren Bruchlastwechselzahlen. Dieser Einfluss ist für höhere Oberspannungen stärker ausgeprägt. Niedrigere Belastungsfrequenzen bzw. Belastungsgeschwindigkeiten führen gleichzeitig zu längeren Belastungsdauern bis zum Bruch. Es gibt Hinweise darauf, dass dieser Einfluss für Frequenzen $f_p > 10$ Hz abnehmen könnte. Für bezogene Oberspannungen $S_O < 0,75$ wurde bisher kein Frequenzeinfluss festgestellt.

Hinsichtlich des Einflusses der Prüffrequenz auf die Dehnungsentwicklungen sind in der Literatur unterschiedliche Ergebnisse dokumentiert. Einerseits wurde keine Beeinflussung der Dehnung bei Oberspannung festgestellt. Es gibt aber auch Hinweise darauf, dass die Dehnung bei Oberspannung im gesamten Ermüdungsprozess und die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase durch die Belastungsfrequenz beeinflusst sein könnten. Der lineare Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl wird jedoch nicht beeinflusst. Für eine bezogene Oberspannung $S_O = 0,75$ wurden kleinere Bruchdehnungen für höhere Belastungsfrequenzen festgestellt. Ein Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Steifigkeitsentwicklung konnte bisher nicht nachgewiesen werden.

Es wurde festgestellt, dass die Bruchlastwechselzahlen für verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten im Wöhlerdiagramm gemeinsam durch eine Gerade beschrieben werden können, wenn als Bezug für die Berechnung der bezogenen Oberspannungen die erhöhte Druckfestigkeit bei erhöhter Belastungsgeschwindigkeit verwendet wird. Andererseits werden als Hintergrund für den Frequenzeinfluss bei hohen bezogenen Oberspannungen unterschiedliche Standzeiten bei hohen Beanspruchungen vermutet. Gleichzeitig wird vermutet, dass das Ermüdungsverhalten bei hohen bezogenen Oberspannungen sowohl von einem zeitlichen Effekt – abhängig von der Wirkungsdauer hoher Beanspruchungen – als auch von einem zyklischen Effekt – abhängig vom Spannungsniveau und der Spannungsamplitude – beeinflusst wird.

Für hochfeste Betone sind nur wenige Untersuchungen zum Frequenzeinfluss bzw. Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Bruchlastwechselzahlen dokumentiert. Für normal- und hochfeste Betone sind zudem kaum systematische Untersuchungen des Einflusses auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen dokumentiert. Inwieweit der Einfluss der Belastungsfrequenz auf das Ermüdungsverhalten normalfester Betone auf das von hochfesten Betonen übertragbar ist, ist nicht geklärt. Aufgrund der unterschiedlichen Gefügestrukturen und des unterschiedlichen Materialverhaltens bei monoton steigender Beanspruchung kann jedoch nicht von einer uneingeschränkten Übertragbarkeit ausgegangen werden.

Zum Einfluss der Wellenform

In der Literatur sind kaum vergleichende Untersuchungen zum Einfluss der Wellenform dokumentiert. Es wird berichtet, dass die Bruchlastwechselzahlen beim Wechsel der zyklischen Wellenform vom Rechteck über den Sinus bis zum Dreieck ansteigen. Es gibt darüber hinaus Hinweise darauf, dass die Dehnungsentwicklungen bei sinusförmiger und dreiecksförmiger Wellenform ähnlich sind, und dass die rechteckförmige Wellenform die schnellste Dehnungsentwicklung hervorruft. Die Datenbasis zum Einfluss der Wellenformen auf die Ermüdungsfestigkeit und auf das Ermüdungsverhalten ist insgesamt gering. Zu hochfesten Betonen konnten diesbezüglich keine dokumentierten Untersuchungen gefunden werden.

2.3 Dauerstandbeanspruchung (Druck)

2.3.1 Grundlagen

Unter dem Begriff Kriechen wird die zeitabhängige Verformungszunahme des Betons unter konstanter Belastung verstanden. Hinsichtlich der Beanspruchungshöhe wird im Allgemeinen zwischen Kriechbeanspruchungen und Dauerstandbeanspruchung unterschieden. Als Kriechbeanspruchungen werden konstante Beanspruchungen im Bereich bis ca. 40 % – 60 % der Druckfestigkeit verstanden. In diesem Bereich erzeugen die Spannungen ein proportionales, „lineares Kriechen“ [Neville – 2011]. Bei Beanspruchungen oberhalb dieses Beanspruchungsniveaus nimmt das Kriechen überproportional zu.

Als Dauerstandbelastungen werden deutlich höhere Belastungen ab ca. 70 % – 80 % der Druckfestigkeit verstanden. Andauernde Belastungen dieser Größenordnung können zum Versagen des Betons führen, ohne dass die Druckfestigkeit überschritten wird. Die Dauerstandfestigkeit wird für normalfeste Betone in der Literatur im Bereich von 70 % – 80 % der Druckfestigkeit angegeben [Rüsch – 1972], [Iravani/ MacGregor – 1998], [Ngab et al. – 1981], [Smadi et al. – 1985].

In Abhängigkeit der Höhe der Beanspruchung (Kriechbelastung/Dauerstandbelastung) existieren Unterschiede hinsichtlich des Verformungsverhaltens und der Mechanismen im Betongefüge. In Abbildung 2.23 ist der dreiphasige Dehnungsverlauf unter hoher konstanter Dauerlast nach [Streit – 1991] gezeigt. Dieser ist durch eine abnehmende Verformungszunahme in Phase I, eine konstante Verformungszunahme in Phase II und eine ansteigende Verformungszunahme in Phase III charakterisiert. Bei niedrigeren Belastungen tritt hauptsächlich das Primärkriechen, ggf. noch ein Teil des Sekundärkriechens auf. Bei hoher Belastung werden alle drei Phasen durchlaufen [Awad / Hilsdorf – 1971], [Smadi et al. – 1985], [Iravani / MacGregor – 1998], wobei das Tertiärkriechen durch die Entstehung von Makrorissen gekennzeichnet ist, was schlussendlich zum Versagen führt [Streit – 1991], [Smadi et al. – 1985], [Schwabach – 2005].

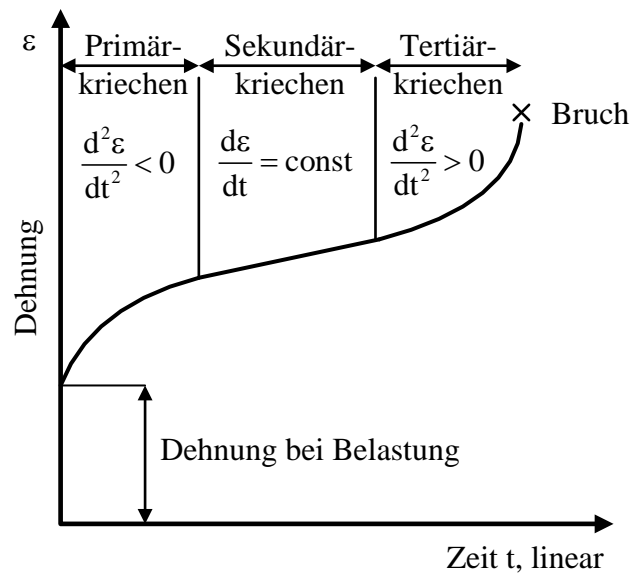


Abbildung 2.23: Dehnungs-Zeit-Diagramm für Beton unter hoher Dauerlast
[Streit – 1991]

Die Mechanismen im Betongefüge bei konstanter Dauerbeanspruchung sind bisher nicht abschließend geklärt [Grübl et al. – 2001], [Neville – 2011]. Hinsichtlich der im Folgenden wiedergegebenen Hintergründe des Materialverhaltens gibt es somit noch keinen abschließenden Konsens.

Das Kriechen findet im Wesentlichen im Zementstein statt. Das Materialverhalten von Beton bei konstanten Dauerbeanspruchungen im Bereich deutlich unterhalb der Linearitätsgrenze (vgl. Abschnitt 2.1.1) – was noch dem linearen Kriechen entspricht – wird mit der Verschiebung von Gelpartikeln sowie mit der Verdrängung von adsorbiertem oder interkristallinem Wasser in die Kapillarporen in Verbindung gebracht [Shen – 1992], [Neville – 2011]. Infolge der Belastung ändern Gelpartikel und Wassermoleküle gleichzeitig ihre Positionen [König et al. – 2001]. Aufgrund der verringerten Porosität des Zementsteins hochfester Betone ist das Kriechen in diesem Belastungsbereich bei hochfesten Betonen weniger ausgeprägt als bei normalfesten Betonen [Ngab et al. – 1981].

Das Materialverhalten unter hohen Dauerstandbeanspruchungen oberhalb der Linearitätsgrenze wird dagegen mit der Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen im Zementstein in Verbindung gebracht [Streit – 1991]. Es wird daher davon ausgegangen, dass Beanspruchungen oberhalb der Spannung, ab der bei monoton steigender Beanspruchung ein nichtlineares Risswachstum eintritt, nach einer bestimmten Dauer der Belastung zum Versagen führen müssen [Ngab et al. – 1981].

Im Folgenden werden Ergebnisse in der Literatur dokumentierter Untersuchungen zum Dauerstandverhalten von Betonen, also bei hohen Beanspruchungsniveaus, vorgestellt.

2.3.2 Einfluss des Beanspruchungsniveaus

Hinsichtlich der Dehnungsentwicklungen bei hoher, konstanter Druckbeanspruchung sind in der Literatur für Betone unterschiedlicher Festigkeiten übereinstimmende Erkenntnisse dokumentiert. So ergeben sich bei kleineren Beanspruchungsniveaus S_D längere Belastungsdauern bis zum Versagen des Betons sowie größere Bruchdehnungen [Awad / Hilsdorf – 1971] ($f_{c,28d} \approx 28 \text{ N/mm}^2$; $S_D = 0,95, 0,90, 0,85$), [Smadi et al. – 1985] ($f_{c,28d} = 55 - 69 \text{ N/mm}^2$, $f_{c,28d} = 34 - 41 \text{ N/mm}^2$, $f_{c,28d} = 28 \text{ N/mm}^2$, $f_{c,28d} = 21 - 24 \text{ N/mm}^2$; $S_D = 0,95, 0,90, 0,85$), [Iravani / MacGregor – 1998] ($f_{c,56d} \approx 65 \text{ N/mm}^2$, $f_{c,56d} \approx 95 \text{ N/mm}^2$, $f_{c,56d} \approx 105 \text{ N/mm}^2$, $f_{c,56d} \approx 120 \text{ N/mm}^2$; $S_D = 0,95, 0,90, 0,85, 0,80, 0,75, 0,70$), [Rüsch et al. – 1968] ($f_{c,28d} = 20 - 60 \text{ N/mm}^2$; $S_D = 0,981 - 0,354$).

Bei gleicher Belastungsdauer führen höhere Beanspruchungsniveaus zu größeren Dehnungen [Tomaszewicz – 1992] ($f_{c,28d} \approx 80 \text{ N/mm}^2$, $f_{c,28d} \approx 100 \text{ N/mm}^2$; $S_D = 0,50 - 0,80$), [Rüsch et al. – 1968]. Die Länge der ersten und dritten Phase der Dehnungsentwicklung ist bei höheren Beanspruchungen kürzer [Iravani / MacGregor – 1998], [Smadi et al. – 1985].

[Awad / Hilsdorf – 1971], [Awad / Hilsdorf – 1972] fanden einen linearen Zusammenhang zwischen der Bruchdehnung und der logarithmierten Belastungsdauer. Sie stellen weiterhin fest, dass Dauerstandbeanspruchungen bei den untersuchten, hohen Beanspruchungsniveaus einen festigkeitssteigernden Effekt infolge Verdichtung und/oder Spannungumlagerungen und einen festigkeitsmindernden Effekt infolge der Entstehung von Mikrorissen haben können.

[Han – 1996] führte unter anderem Dauerstandversuche an einem hochfesten Beton durch ($f_{c,28d} \approx 120 \text{ N/mm}^2$; $S_D = 0,95, 0,85, 0,75$). Für das kleinste Beanspruchungsniveau trat kein Versagen auf. Die nachträglich ermittelten Restfestigkeiten lagen um 5 % höher als die Ausgangsfestigkeits. Mit kleiner werdender Belastung erhöhte sich die Belastungsdauer bis zum Bruch. Die in [Han – 1996] dokumentierten Bruchdehnungen sind wie bei [Awad / Hilsdorf – 1971], [Awad / Hilsdorf – 1972] für kleinere Beanspruchungsniveaus größer.

[Diaz / Hilsdorf – 1971] ($f_{c,28d} \approx 23 \text{ N/mm}^2$; $S_D = 0,95, 0,85$) stellen für $S_D = 0,85$ kaum Rissentwicklung während der Erhöhung der Belastung bis zum Erreichen des Beanspruchungsniveaus fest. Danach zeigte sich eine Zunahme von Kontaktzonenrissen. Vereinzelt traten auch Risse zwischen benachbarten Kontaktzonenrissen auf. Bei einer bezogenen Belastungsdauer $t/t_U = 0,60 - 0,80$ wurde ein deutlich stärkeres Reißen beobachtet. Beim Versagen entstanden breite Risse. Für $S_D = 0,95$ war die Rissentwicklung unter Dauerstandbeanspruchung ähnlich der bei zyklischer Belastung, nur die Risslänge war bei Dauerstandbeanspruchung größer.

[Shah / Chandra – 1970] untersuchten ebenfalls die Rissentstehung und -fortpflanzung unter Dauerstandbeanspruchung ($S_D = 0,90 - 0,60$). Wie bei zyklischer Beanspruchung, stellen sie für niedrige Beanspruchungsniveaus $S_D \leq 0,70$, bei denen kein Versagen eintrat, ein stabiles

und langsames Risswachstum fest. Dagegen beschreiben sie für höhere Beanspruchungen $S_D > 0,70$ ein schnelles Risswachstum.

2.3.3 Einfluss der Betondruckfestigkeit

Zum Einfluss der Betondruckfestigkeit auf das Dauerstandverhalten stellten [Smadi et al. – 1985] fest, dass die Belastungsdauer bis zum Versagen für gleiche bezogene Beanspruchungsniveaus S_D bei höherfesten Betonen länger als bei Betonen niedrigerer Festigkeiten ist. Für höherfeste Betone ist die erste Phase der Dehnungsentwicklung zudem länger, die dritte Phase dagegen kürzer. Für hochfeste Betone zeigte sich in diesen Untersuchungen eine höhere Dauerstandfestigkeit $S_{D,f}$ im Bereich von 80 % – 85 % der Kurzzeitfestigkeit. Darüber hinaus ist die Kriechdehnung beim Versagen für hochfeste Betone kleiner, so [Smadi et al. – 1985].

[Iravani / MacGregor – 1998] berichten ebenfalls von einer längeren ersten und einer kürzeren dritten Phase der Dehnungsentwicklung bei hochfesten Betonen. Zusätzlich stellen sie für höherfeste Betone längere zweite Phasen fest. Dagegen führt der Einsatz von Silika zu einer Verkürzung der ersten Phase und zu einer Verkleinerung der Bruchdehnung. Die Standzeit bis zum Versagen war für höherfeste Betone größer. [Iravani / MacGregor – 1998] geben folgende Bereiche der Dauerstandfestigkeit an:

Druckfestigkeit f_c	Dauerstandfestigkeit $S_{D,f}$
65 N/mm ²	70 – 75 %
95 N/mm ²	75 – 80 %
105 N/mm ²	85 – 90 %
120 N/mm ²	85 – 90 %

Tabelle 2.1: Dauerstandfestigkeit in Abhängigkeit der Betonfestigkeiten
(nach [Iravani / MacGregor – 1998])

[Han – 1996] gibt die Dauerstandfestigkeit $S_{D,f}$ des von ihm untersuchten hochfesten Betons ($f_{c,28d} \approx 120$ N/mm²) zu 80 % der Druckfestigkeit an.

In [Ngab et al. – 1981] bzw. [Ngab et al. – 1981a] sind Untersuchungen an normal- und hochfesten Betonen dokumentiert ($f_c \approx 30$ N/mm² – 70 N/mm²; $S_D = 0,85$ – 0,45). Auch ihre Ergebnisse zeigen, dass die Dauerstandfestigkeit bei hochfesten Betonen größer ist, als bei normalfesten Betonen. [Ngab et al. – 1981a] berichten zudem, dass für hochfeste Betone ein linearer Zusammenhang zwischen der Kriechdehnung und der Spannung bei Dauerbeanspruchung bis ca. 70 % der Druckfestigkeit besteht. Somit ist dieser Bereich deutlich größer als bei normalfesten Betonen, für den [Ngab et al. – 1981a] die Grenze des linearen Kriechens auf Grundlage von [Freudenthal / Roll – 1958], [Neville – 1970] und [Roll – 1964] mit 50 %

der Druckfestigkeit angeben. Sie gehen weiterhin von einer erhöhten Dauerstandfestigkeit von hochfestem Beton im Bereich von 85 % – 95 % der Druckfestigkeit aus. [Ngab et al. – 1981a] zeigen darüber hinaus anhand von mikroskopischen Aufnahmen, dass das Risswachstum unter Dauerstandbeanspruchung bei hochfesten Betonen weniger ausgeprägt ist als bei normalfesten Betonen.

2.3.4 Zusammenhang zwischen dem Materialverhalten bei Dauerstandbeanspruchung und monoton steigender Beanspruchung

In vielen in der Literatur dokumentierten Forschungsarbeiten zum Dauerstandverhalten von Betonen wird versucht, Hinweise auf die Dauerstandfestigkeit anhand des Materialverhaltens unter monoton steigender Beanspruchung abzuleiten.

[Ngab et al. – 1981] bzw. [Ngab et al. – 1981a] sehen für hochfeste Betone einen Zusammenhang zwischen der Diskontinuitätsgrenze und der Dauerstandfestigkeit. Mit der Diskontinuitätsgrenze bezeichnen sie die Spannung, bei der unter monoton steigender Beanspruchung ein „instabiles Risswachstum“ eintritt. Sie stellen fest, dass eine konstante Dauerbeanspruchung oberhalb der Diskontinuitätsgrenze aufgrund des dann eintretenden verstärkten Mikrorisswachstums auf die Dauer zum Versagen führt. [Iravani / MacGregor – 1998] sehen ebenfalls einen Zusammenhang zwischen der Beanspruchung, bei der bei monoton steigender Beanspruchung ein instabiles Risswachstum einsetzt, und der Dauerstandfestigkeit. Sie setzen den Beginn des instabilen Risswachstums für hochfeste Betone jedoch mit der Linearitätsgrenze gleich und geben an, dass diese eine gute Approximation der Dauerstandfestigkeit darstellt.

[Smadi et al. – 1985] betrachten die Dehnungsentwicklungen unter Dauerstandbeanspruchung und vermuten eine kritische Dehnung am Ende der Phase I, nach deren Erreichen es zu einem instabilen Risswachstum kommt, was abschließend zum Versagen führt. Diese kritische Dehnung am Ende der Phase I sei etwas größer als die Dehnung bei Maximallast infolge monoton steigender Beanspruchung, aber kleiner als die Bruchdehnung, so [Smadi et al. – 1985]. Die kritische Dehnung werde mit steigender Betonfestigkeit größer.

[Awad / Hilsdorf – 1971] beschreiben für den von ihnen untersuchten normalfesten Beton, dass hohe Dauerstandbeanspruchungen zu größeren Bruchdehnungen führen, als sie bei monoton steigender Beanspruchung auftreten.

2.3.5 Zusammenfassung und Beurteilung

Der Fokus vieler Untersuchungen zum Dauerstandverhalten von Betonen lag auf der Ermittlung der Dauerstandfestigkeit bzw. auf der Ableitung eines Zusammenhangs zwischen der Dauerstandfestigkeit und der Spannungs-Dehnungslinie bei monoton steigender Beanspruchung. Hinsichtlich der Dehnungsentwicklungen ist bekannt, dass sich unter hoher Dauerstandbeanspruchung bis zum Versagen ein dreiphasiger Verlauf der Dehnungsentwicklung

einstellt. Dieser ist charakterisiert durch einen überproportionalen Anstieg der Dehnungen in der ersten und dritten Phase und einem linearen Anstieg in der zweiten Phase und ähnelt damit den Dehnungsentwicklungen unter Ermüdungsbeanspruchung (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Bei niedrigeren Beanspruchungsniveaus sind die Dauer bis zum Versagen, die Dauer der ersten und zweiten Phase und die Bruchdehnung größer. Bei gleicher Belastungsdauer ist die Dehnung für höhere Beanspruchungsniveaus gleichzeitig größer. Es gibt Hinweise darauf, dass zwischen der Bruchdehnung und der logarithmierten Belastungsdauer ein linearer Zusammenhang bestehen könnte. Hohe Dauerstandbeanspruchungen führen bei normalfesten Betonen zu größeren Bruchdehnungen als monoton steigende Beanspruchungen. Darüber hinaus gibt es in der Literatur Hinweise darauf, dass sowohl ein festigkeitssteigernder als auch ein festigkeitsmindernder Effekt hoher Dauerstandbeanspruchungen besteht.

Die Dauerstandfestigkeit hochfester Betone ist größer als die normalfester Betone. Die Dauer bis zum Versagen ist bei gleichem Beanspruchungsniveau für höherfeste Betone länger. Für höherfeste Betone ist die erste und zweite Phase länger und die dritte Phase kürzer als bei Betonen niedrigerer Festigkeiten. Die Kriechdehnung ist für hochfeste Betone kleiner. Das Risswachstum ist bei hochfesten Betonen weniger stark ausgeprägt als bei normalfesten Betonen. Unabhängig von der Festigkeit der Betone soll die Spannung, ab der unter monoton steigender Belastung ein instabiles Risswachstum im Beton auftritt, eine gute Approximation der Dauerstandfestigkeit darstellen.

Die Literaturrecherche zeigt insgesamt, dass das Materialverhalten bei hoher Dauerstandbeanspruchung stark von der Beanspruchungshöhe sowie von der Festigkeit des Betons abhängig ist. Es wird im Allgemeinen ein Zusammenhang zum Materialverhalten von Betonen bei monoton steigender Beanspruchung gesehen. Gleichzeitig ähneln sich die Verläufe der Dehnungsentwicklungen bei (hoher) Dauerstandbeanspruchung und Ermüdungsbeanspruchung.

2.4 Vergleich des Materialverhaltens von Beton bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten

2.4.1 Materialverhalten bei zyklischer Beanspruchung und monoton steigender Beanspruchung

In der Literatur sind Bestrebungen dokumentiert, Zusammenhänge des Materialverhaltens bei zyklischer Beanspruchung und bei monoton steigender Beanspruchung zu finden. Es ist jedoch bei vergleichenden Untersuchungen häufig nicht dokumentiert, unter Verwendung welcher Regelungsart die Versuche mit monoton steigender Beanspruchung durchgeführt worden sind. Aufgrund unterschiedlicher Spannungs-Dehnungslinien bei Kraft- oder Wegregelung

(vgl. Abschnitt 2.1.1) sollte die Regelungsart jedoch insbesondere beim Vergleich von Bruchdehnungen beachtet werden.

Bei verformungs- oder dehnungsgeregelter zyklischer Versuchsdurchführung wird oftmals innerhalb von wenigen Lastwechseln der gesamte Dehnungsbereich inklusive der Dehnungen im Bereich des abfallenden Astes der Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung durchlaufen. Anders als bei kraftgeregelter Versuchsdurchführung wird in diesen Versuchen die Verformung über die Lastwechsel gesteigert. Die abhängige Größe der aufnehmbaren Kraft nimmt bei dieser Versuchsart über die Lastwechsel ab, wie in Abbildung 2.24 zu sehen ist. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass die ermittelten Hysteresen der zyklischen Belastung durch die Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung eingehüllt werden. Diese Spannungs-Dehnungslinie bildet also eine Grenzkurve für das Dehnungsverhalten von Beton unter zyklischer, weg- oder verformungsgeregelter Beanspruchung (Envelope-Konzept), z. B. [Sinha et al. – 1964], [Karsan / Jirsa – 1969].

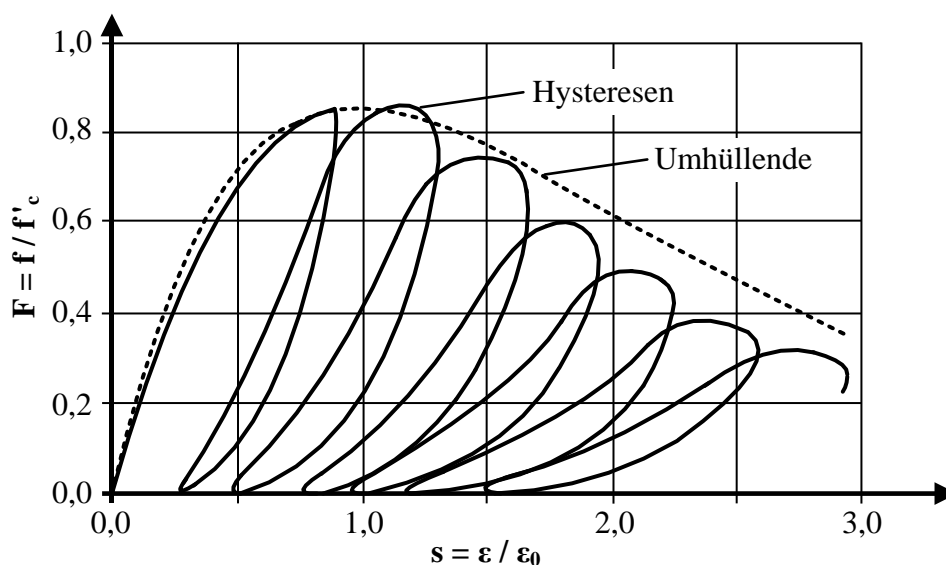


Abbildung 2.24: Vergleichende Darstellung von Hysteresen und umhüllender Kurve
[Sinha et al. – 1964]

[Awad / Hilsdorf – 1971] stellen für einen normalfesten Beton ($f_{c,28d} \approx 28 \text{ N/mm}^2$) unter hohen Beanspruchungen fest ($S_0 = 0,90$; $\Delta S = 0,10, 0,50, 0,90$; $\dot{\sigma} = 0,069 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $0,69 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ und $6,9 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), dass die zyklischen Bruchdehnungen außerhalb der Arbeitslinie liegen ($\dot{\epsilon} = 10^{-3}, 10^{-5}, 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, weggeregelt). Darüber hinaus zeigen ihre Untersuchungsergebnisse, dass die zyklischen Bruchdehnungen für kleinere bezogene Unterspannungen dichter an der Bruchdehnung infolge monoton steigender Beanspruchung liegen.

[Petković – 1991] und [Do et al. – 1993] berichten für hochfeste Betone, dass die Bruchdehnungen infolge Ermüdungsbeanspruchung gleich groß oder unwesentlich größer sind als die infolge monoton steigender Beanspruchung auftretenden Bruchdehnungen. Dagegen berich-

ten [Kono et al. – 2008] für einen hochfesten Beton, dass die Dehnungen beim Ermüdungsversagen kleiner als beim Versagen infolge monoton steigender Beanspruchung sind. Das Envelope-Konzept wird wegen des belastungsgeschwindigkeitsabhängigen Betonverhaltens von [Awad / Hilsdorf – 1971] kritisch betrachtet.

[Pfanner – 2003] entwickelte, aufgrund von in der Literatur dokumentierten Untersuchungen, ein energiebasiertes Schädigungsmodell unter anderem für Beton unter Druckschwellbeanspruchung. Grundlage dieses Modells ist folgende „Schädigungshypothese“, die die Invarianz der zur Erlangung eines bestimmten Schädigungszustands in Schädigung dissipierten Energie impliziert:

„Die im Ermüdungsprozess aufzubringende Arbeit W^{fat} , die erforderlich ist, um einen bestimmten (geschädigten) Zustand des Materials zu erreichen, entspricht genau der Arbeit W^{da} , die durch eine monotone statische Belastung aufgewendet wird, um den gleichen Schädigungszustand D herzustellen.“ ([Pfanner – 2003], S. 51).

Diese Hypothese lässt sich in ein Energiegleichgewicht überführen, das in Abbildung 2.25 schematisch dargestellt ist.

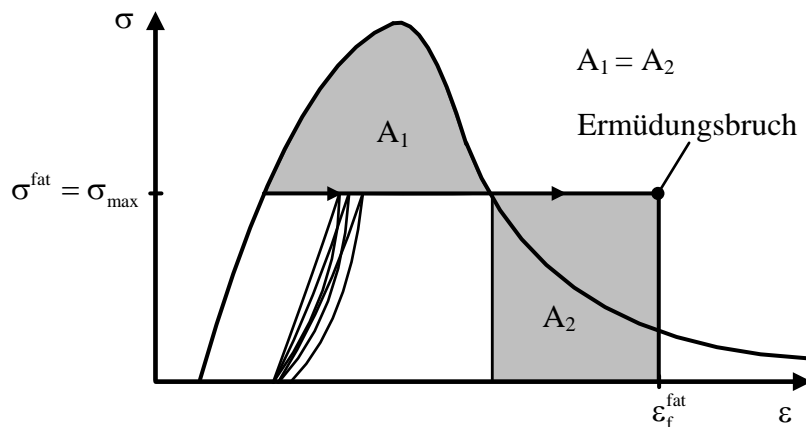


Abbildung 2.25: Hypothese gleicher in Schädigung dissipierter Energien bei zyklischer und monoton steigender Beanspruchung [Pfanner – 2003]

[Pfanner – 2003] nimmt an, dass beim Versagen infolge einer Ermüdungsbeanspruchung bestimmter Oberspannung ein Schädigungszustand erreicht ist, der dem Schädigungszustand beim Erreichen der gleichen Beanspruchung auf dem abfallenden Ast der Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung entspricht. Wie in Abbildung 2.25 zu sehen ist, wird das Energiegleichgewicht nur erreicht, wenn die Flächen A_1 und A_2 gleich groß sind. „Man erkennt, dass die Annahme der Invarianz der schädigungswirksamen Energie immer auf Versagensverzerrungen führen muss, die außerhalb der monotonen Arbeitslinie liegen.“ [Pfanner – 2003], S. 62.

Innerhalb des Schädigungsmodells wird die Arbeit bei zyklischer Beanspruchung iterativ mit der Fläche unter der Spannungs-Dehnungslinie bei monoton steigender Beanspruchung verglichen und hieraus der jeweilige Schädigungszustand unter Ermüdungsbeanspruchung bestimmt. Die Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung und die zyklische Dehnungsentwicklung müssen hierfür bekannt sein. Als Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung wird der Verlauf eines weggeregelten Versuchs berücksichtigt, d. h. [Pfanner – 2003] geht von einem abfallenden Ast der Spannungs-Dehnungslinie aus. Hinsichtlich der Ermüdungsbeanspruchung geht [Pfanner – 2003] von kraftgeregelter Lastaufbringung aus. Darüber hinaus werden die Bruchlastwechselzahlen in dem Algorithmus über einen Ansatz zur Beschreibung der Wöhlerlinie nach [Hsu – 1981] berücksichtigt, der neben dem Einfluss der Ober- und Unterspannungsniveaus auch den Einfluss der Belastungsfrequenz beschreibt. Das Schädigungsmodell kann zur Berechnung eines nach einer bestimmten Lastwechselzahl erreichten Schädigungsgrads herangezogen werden. Das belastungsgeschwindigkeitsabhängige Betonverhalten findet bei der Beschreibung der Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung keine Berücksichtigung.

[Diaz / Hilsdorf – 1971] untersuchten die Rissentstehung und Rissfortpflanzung bei monoton steigender (weggeregelt) und zyklischer Belastung (kraftgeregelt) an einem normalfesten Beton ($f_{c,28d} \approx 23 \text{ N/mm}^2$; $S_O = 0,95, 0,85$; $S_U \approx 0$; $f_p \approx 0,02 \text{ Hz}$). Wie bereits zuvor erläutert, konnten hinsichtlich der Rissentstehung- und Rissfortpflanzung bei Ermüdungsbeanspruchung Parallelen zur monoton steigenden Beanspruchung gezogen werden (vgl. 2.2.3 Abschnitt). [Diaz / Hilsdorf – 1971] beschreiben, dass die zum Versagen führende „Risskonfiguration“ jedoch abhängig von der Belastungsart ist, es also hinsichtlich der Gefügeschädigung beim Versagen Unterschiede zwischen monoton steigend beanspruchtem und zyklisch beanspruchtem Beton gibt. Es sei erwähnt, dass die untersuchte Frequenz bei diesen Versuchen sehr niedrig gewählt war.

Wenige in der Literatur dokumentierte Untersuchungen betrachten jeweils die gesamten Dehnungsentwicklungen (zyklisch und monoton steigend) vergleichend. Die dokumentierten Ansätze gehen dabei immer von dem Vorhandensein eines abfallenden Astes der Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung aus, der jedoch im kraftgeregelten Versuch gar nicht und für hochfeste Betone im Allgemeinen kaum ermittelbar ist (vgl. Abschnitt 2.2.4). In [Hohberg – 2004] ist hierzu der in Abbildung 2.26 dargestellte schematische Zusammenhang enthalten. Es ist zu sehen, dass die Dehnung beim Übergang von der zweiten zur dritten Phase (Punkt C), und damit die Einleitung des Ermüdungsversagens, hiernach als äquivalent zu einer Dehnung nach dem Erreichen der Maximallast bei monoton steigender Beanspruchung angenommen wird. Außerdem wird von einer gleich großen Bruchdehnung infolge monoton steigender und zyklischer Beanspruchung (Punkt D) ausgegangen. Leider ist der Ursprung dieser Abbildung nicht nachvollziehbar.

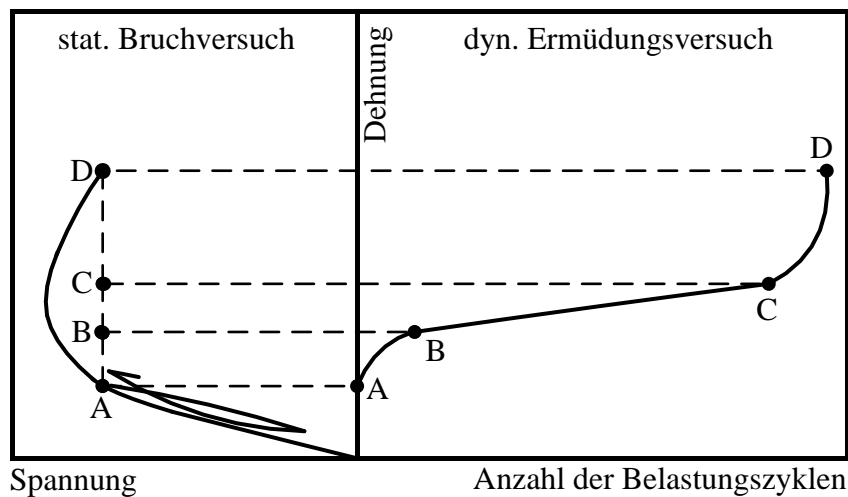


Abbildung 2.26: Zusammenhang zwischen der Dehnung infolge monoton steigender und zyklischer Beanspruchung [Hohberg – 2004]

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt [Balázs – 1994], der Versuche mit monoton steigender Beanspruchung und Ermüdungsversuche zum Schlupf im Verbund zwischen Bewehrung und Beton betrachtet. [Balázs – 1994] geht davon aus, dass der Übergang in die dritte Phase der Verbundschlupfentwicklung bei gleichem Verbundschlupf stattfindet, wie bei Maximallast infolge monoton steigender Beanspruchung (vgl. Abbildung 2.27). Somit wäre die Einleitung des Ermüdungsversagens anhand von Versuchen mit monoton steigender Beanspruchung ableitbar und damit ein „verformungsbasiertes Versagenkriterium“ [Balázs – 1994] gefunden.

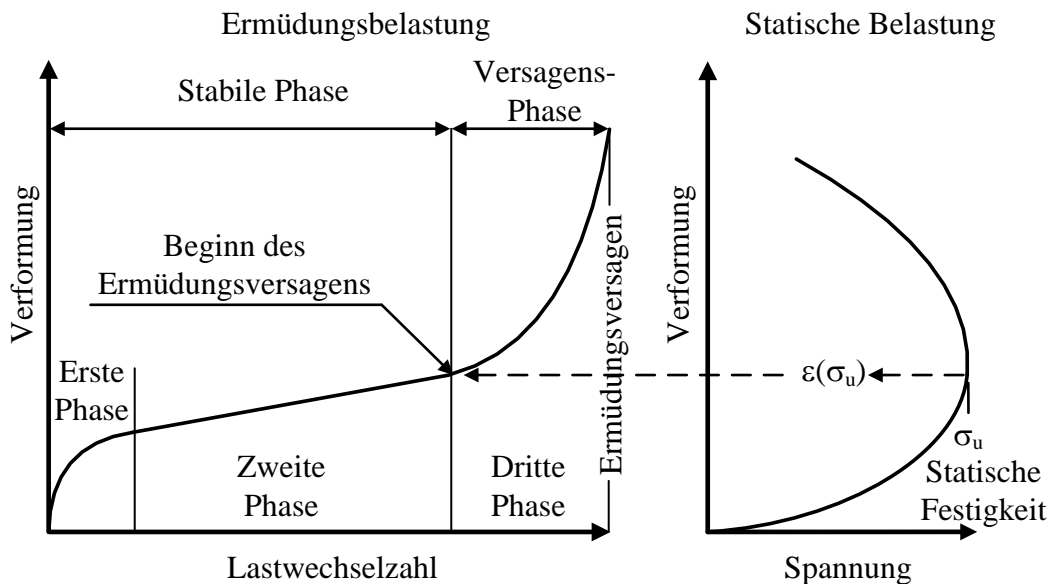


Abbildung 2.27: Verbundschlupf zwischen Bewehrung und Beton bei zyklischer und monoton steigender Beanspruchung [Balázs – 1994]

2.4.2 Materialverhalten bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung

Wie bereits zuvor erläutert wurde, zeigen sowohl die Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung als auch die Dehnungsentwicklungen bei Dauerstandbeanspruchung einen dreiphasigen, s-förmigen Verlauf. In einigen Literaturstellen wird daher auch vom „statischen Kriechen“ und „dynamischen Kriechen“ gesprochen z. B. [Suter / Mickleborough – 1975]. In der Literatur wird der Frage nachgegangen, inwiefern Gemeinsamkeiten des Dehnungsverhaltens bei beiden Beanspruchungsarten existieren. Dabei wird die zyklische Dehnungsentwicklung bei Oberspannung mit der Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung verglichen.

[Mehmel / Kern – 1962] führten vergleichende Druckschwell- und Dauerstandversuche an zwei normalfesten Betonen durch (B450 (Beton 1 und 2), B225 (Beton 3 und 4); $S_O = 0,80; 0,60; 0,40$; $\sigma_U/\sigma_O = 0,15; 0,45; 0,90$; $f_P = 6,3$ Hz; $S_D = 0,70; 0,60; 0,50; 0,40$). Für die gleiche Belastungsdauer und das gleiche Beanspruchungs- bzw. Oberspannungsniveau stellten [Mehmel / Kern – 1962] nur geringe Unterschiede der Dehnungen fest. Wobei die Dehnungen unter Dauerstandbeanspruchung etwas größer waren. In Abbildung 2.28 ist beispielhaft eine vergleichende Darstellung der Dehnungen nach $0,5 \cdot 10^6$ Lastwechseln bzw. 22 Stunden gezeigt [Mehmel / Kern – 1962].

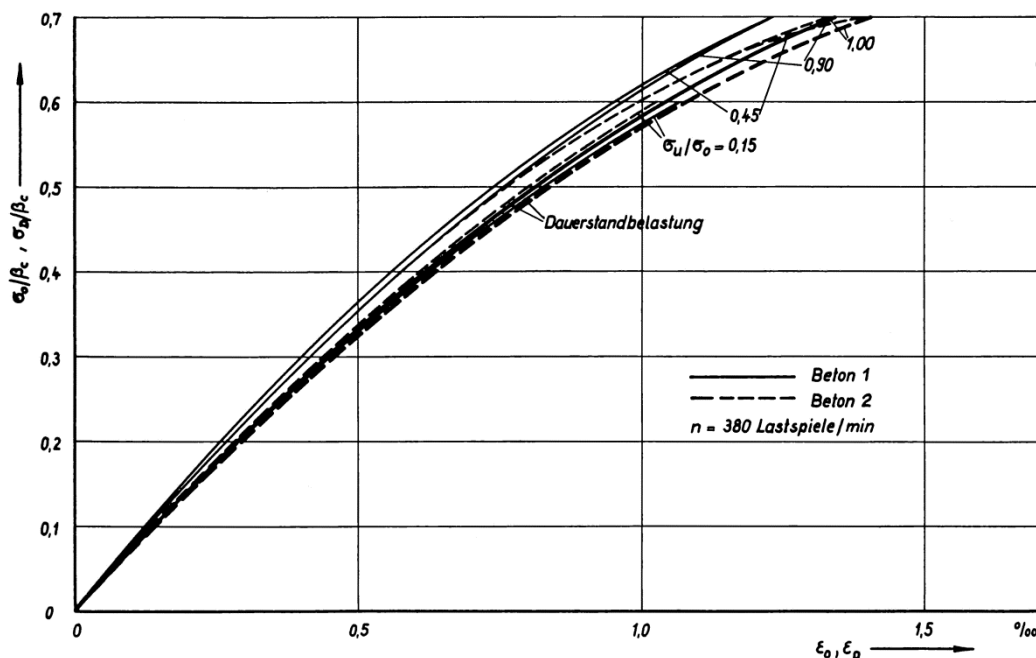


Abbildung 2.28: Vergleich der Dehnungen nach $0,5 \cdot 10^6$ Lastwechseln bzw. 22 Stunden für Druckschwell- und Dauerstandbeanspruchung [Mehmel / Kern – 1962]

[Weigler / Rings – 1987] führten Druckschwellversuche an einem normalfesten Beton durch ($f_{c,cube,28d} = 35$ N/mm²; $S_O = 0,65$; $S_U = 0,05$; $f_P = 1,0$ Hz) und werteten den Zusammenhang

zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Belastungsdauer im Vergleich zu Dauerstandversuchen von [Rüsch et al. – 1968] aus. [Weigler / Rings – 1987] stellen diesbezüglich ebenfalls kaum Unterschiede zwischen beiden Beanspruchungsarten fest.

In [Whaley / Neville – 1973] sind vergleichende zyklische Untersuchungen und Dauerstanduntersuchungen an einem normalfesten Beton ($f_{c,14d} \approx 39 \text{ N/mm}^2$; $S_D = 0,15 - 0,55$; $S_O = 0,30 - 0,65$; $S_U = 0,05 - 0,30$, $f_p = 9,8 \text{ Hz}$) dokumentiert. Die Belastungsdauer aller Versuche war auf 200 Stunden begrenzt. Anders als [Mehmel / Kern – 1962] und [Weigler / Rings – 1987] stellen [Whaley / Neville – 1973] in ihren Versuchen bei gleicher Belastungsdauer und gleichem Oberspannungs- bzw. Beanspruchungsniveau deutliche Unterschiede zwischen den zyklischen Dehnungen und den Dehnungen bei Dauerstandbeanspruchung fest, wobei die zyklischen Dehnungen größer waren (siehe Abbildung 2.29).

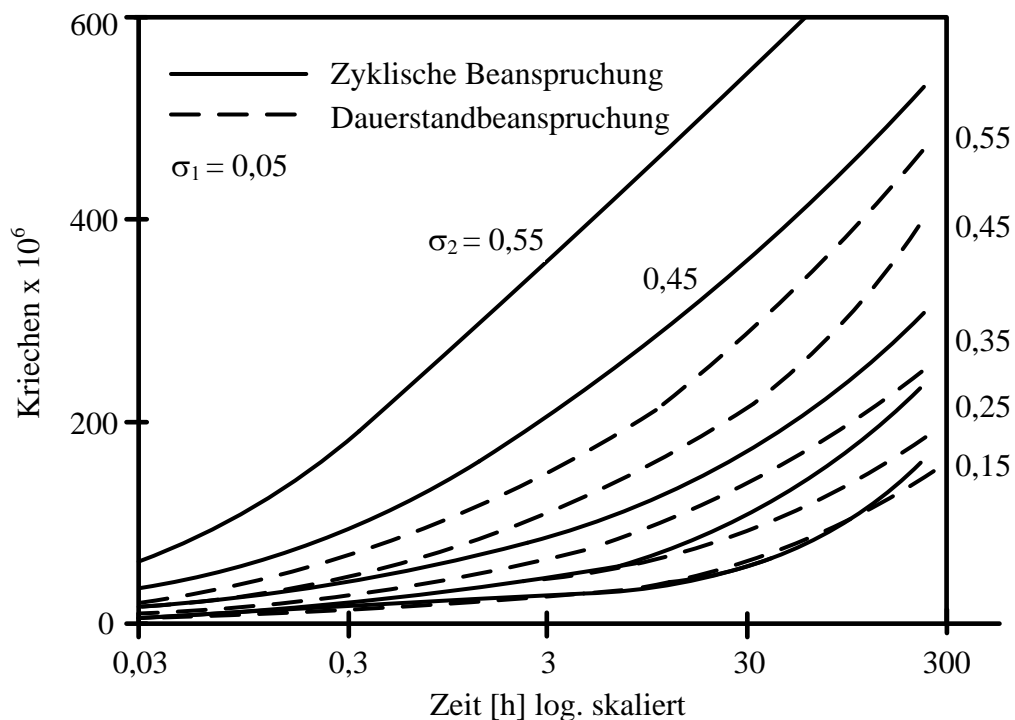


Abbildung 2.29: Vergleich der Dehnung bei Druckschwell- bzw. Dauerstandbeanspruchung
[Whaley / Neville – 1973]

[Whaley / Neville – 1973] gehen davon aus, dass sich die unter zyklischer Belastung einstellende Gesamtdehnung bei Oberspannung als Summe eines Dehnungsanteils unter konstanter Mittellast und eines Dehnungsanteils infolge der Amplitude zusammensetzt. Diese Hypothese können sie jedoch nur für bezogene Oberspannungen bis $S_O = 0,35$ verifizieren. Die Abweichungen bei größeren bezogenen Oberspannungen führen [Whaley / Neville – 1973] auf die bei höheren zyklischen Beanspruchungsniveaus vorhandene Mikrorissbildung zurück. Inge-

samt gehen [Whaley / Neville – 1973] davon aus, dass die Dehnungszunahme unter konstanter Beanspruchung durch die zyklisch veränderte Spannung beschleunigt wird.

Anders als bei [Whaley / Neville – 1973] zeigen die Untersuchungsergebnisse von [Suter / Mickleborough – 1975] für normalfeste Betone ($f_c \approx 18 - 37 \text{ N/mm}^2$; $S_O = S_D = 0,2 - 0,5$; $S_U = 0,15$; $f_P = 25 \text{ Hz}$), dass die Dehnungen unter Dauerstandbeanspruchung größer sind als die Dehnungen unter zyklischer Beanspruchung nach gleicher Belastungsdauer.

[Awad / Hilsdorf – 1971] führten vergleichende dreiecksförmige zyklische Versuche und Dauerstandversuche an einem normalfesten Beton durch ($f_{c,28d} \approx 28 \text{ N/mm}^2$; $S_O = S_D = 0,95, 0,90, 0,85$; $\Delta S = S_O - S_U = 0,05$ bis S_O ; $\dot{\sigma} = 0,069 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Die Bruchdehnungen des normalfesten Betons waren bei zyklischer Beanspruchung kleiner als bei Dauerstandbeanspruchung. Die Bruchdehnungen bei Dauerstandbeanspruchung stellten obere Grenzwerte für die zyklischen Dehnungen dar, so [Awad / Hilsdorf – 1971].

[Diaz / Hilsdorf – 1971] untersuchten die Rissentstehung und Rissfortpflanzung bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung an einem normalfesten Beton ($f_{c,28d} \approx 23 \text{ N/mm}^2$; $S_O = S_D = 0,95, 0,85$; $S_U \approx 0$; $f_P \approx 0,02 \text{ Hz}$). Obwohl die Rissentstehung und Rissfortpflanzung unter zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung ähnlich sind, ist der Anstieg der Rissdichte vor dem Versagen bei zyklischer Beanspruchung ausgeprägter als bei Dauerstandbeanspruchung. Die Rissdichte beim Versagen sei dagegen bei Dauerstandbeanspruchung größer. [Diaz / Hilsdorf – 1971] schlussfolgern, dass eine für verschiedene Belastungsarten einheitliche, zum Versagen führende „Risskonfiguration“ unwahrscheinlich ist.

[Shah / Chandra – 1970] untersuchten die Rissentstehung und Rissfortpflanzung bei zyklischer, dreiecksförmiger Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung ebenfalls bei sehr niedrigen Belastungsfrequenzen ($S_D = S_O = 0,90 - 0,60$; $S_U = 0,10$; $f_P = 0,07 - 0,1 \text{ Hz}$). Für beide Belastungsarten stellen sie in Abhängigkeit vom Beanspruchungsniveau ein langsames, stabiles ($S_D = S_O \leq 0,70$) oder ein sehr schnelles Risswachstum ($S_D = S_O > 0,70$) fest. Ihre Untersuchungen zeigen zudem, dass die Be- und Entlastungsprozesse zyklischer Beanspruchungen zusätzliche Risse hervorrufen.

2.4.3 Zusammenfassung und Beurteilung

Für Vergleiche der Dehnungen infolge monoton steigender und zyklischer Beanspruchung sollte die Regelungsart in den Versuchen sowie die Belastungsgeschwindigkeit beachtet werden. In der Literatur ist dokumentiert, dass die zyklischen Bruchdehnungen hochfester Betone im Bereich der Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung oder darunter liegen könnten. Die „Schädigungshypothese“ und das energiebasierte Schädigungsmodell nach [Pfanner – 2003] implizieren dagegen, dass die Bruchdehnungen infolge zyklischer Beanspruchung außerhalb der Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspru-

chung liegen müssen und somit größer als die Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung sein müssen, damit ein Energiegleichgewicht erreicht werden kann.

Es sind keine Untersuchungsergebnisse zu möglichen Zusammenhängen zwischen den Dehnungsentwicklungen von Beton infolge zyklischer und monoton steigender Beanspruchungen dokumentiert. Für Verbundschlupf sind jedoch Überlegungen zu einem „verformungsbasierten Versagenskriterium“ [Balázs – 1994] dokumentiert. In [Hohberg – 2004] ist eine schematische Darstellung von Betondehnungen infolge monoton steigender und zyklischer Beanspruchung enthalten, bei der ebenfalls von einem Zusammenhang zwischen dem Dehnungsverhalten beider Beanspruchungsarten ausgegangen wird.

Zum Zusammenhang des Dehnungsverhaltens bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung sind keine Untersuchungen an hochfesten Betonen dokumentiert. Die dokumentierten Untersuchungen für normalfeste Betone unterscheiden sich in der Relation der verglichenen Beanspruchungsniveaus bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung. Für normalfeste Betone wurden kleinere Bruchdehnungen infolge zyklischer Beanspruchung als infolge Dauerstandbeanspruchung festgestellt. Hinsichtlich der Dehnungsentwicklungen gibt es widersprüchliche Ergebnisse dazu, ob die Dehnungen bei Dauerstandbeanspruchung ähnlich groß, größer oder kleiner als die Dehnungen bei zyklischer Beanspruchung sind.

Es wird davon ausgegangen, dass die Dehnungsentwicklung bei zyklischer Beanspruchung schneller verläuft als bei Dauerstandbeanspruchung. Hierzu ist in der Literatur ebenfalls dokumentiert, dass Be- und Entlastungsprozesse gegenüber Dauerstandbeanspruchungen zusätzliche Risse im Beton verursachen. Darüber hinaus wurde anhand eines normalfesten Betons festgestellt, dass es zwar Parallelen zwischen der Rissentstehung und Rissfortpflanzung im Verlauf der Beanspruchungen gibt, die Risskonfiguration beim Versagen jedoch bei beiden Beanspruchungsarten unterschiedlich ist.

Die Literaturrecherche zu vergleichenden Untersuchungen des Dehnungsverhaltens von Beton bei verschiedenen Beanspruchungsarten zeigt deutlich, dass nur wenige Untersuchungen hierzu existieren. Insbesondere mögliche Einflüsse der Belastungsfrequenz auf die Dehnungsentwicklungen unter Ermüdungsbeanspruchung wurden bei den meisten dieser Untersuchungen nicht berücksichtigt (vgl. hierzu auch Abschnitt 2.2.5). Des Weiteren sollten die Beanspruchungshöhen bzw. Regelungsarten bei solchen Untersuchungen aufeinander abgestimmt werden.

Kapitel 3

Arbeitsbereiche und Ableitung konkreter Fragestellungen

3.1 Festlegung der Arbeitsbereiche

Es gibt bereits umfangreiche Untersuchungen zu den Bruchlastwechselzahlen verschiedener Betone unter zyklischer Belastung. Auch zur Beeinflussung der Bruchlastwechselzahlen durch die Belastungsfrequenz sind bereits einige Untersuchungen in der Literatur dokumentiert. Zum Dehnungs- und Steifigkeitsverhalten von Betonen unter Ermüdungsbeanspruchung sind jedoch nur vereinzelte und teilweise widersprüchliche Untersuchungsergebnisse dokumentiert. Diese reichen bei weitem nicht aus, um die Systematiken der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen, auch vor dem Hintergrund verschiedener zyklischer Belastungen, zu erkennen und zu beschreiben. Für hochfeste Betone sind zudem weit weniger Untersuchungsergebnisse zum Ermüdungsverhalten dokumentiert.

Insgesamt bestehen große Wissenslücken, die in der Praxis zu Unsicherheiten bei der Beurteilung der zuverlässigen Nutzbarkeit des Ermüdungswiderstands von Betonen führen. Gleichzeitig sind in der Literatur Hypothesen zu möglichen Ursachen des Ermüdungsverhaltens dokumentiert, die auf Grundlage von Bruchlastwechselzahlen aufgestellt worden sind. Diese Hypothesen sind jedoch kaum durch Dritte beurteilt und überprüft.

Darüber hinaus sind in der Literatur Überlegungen zu möglichen Zusammenhängen zwischen dem Materialverhalten bei Ermüdungsbeanspruchung und dem bei monoton steigender Beanspruchung bzw. Dauerstandbeanspruchung dokumentiert (z. B. [Hohberg – 2004], [Mehmel / Kern – 1962]). Gleichzeitig gibt es einige Ansätze zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens anhand des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender Beanspruchung und bei Dauerstandbeanspruchung (z. B. [Pfanner – 2003], [Whaley / Neville – 1973]), Gestützt werden diese Überlegungen und Ansätze durch die festgestellten Parallelen bei der Entstehung und Fortpflanzung von Rissen im Belastungsprozess [Diaz / Hilsdorf – 1971].

Diese Überlegungen und Ansätze sind jedoch nicht durch entsprechende Untersuchungen verifiziert und haben daher den Charakter von Hypothesen. Darüber hinaus basieren sie oftmals auf Versuchsergebnissen aus experimentellen Untersuchungen, die nicht ausreichend hinsichtlich der Beanspruchungshöhe, der Belastungsgeschwindigkeit und der Regelungsart aufeinander abgestimmt waren. Eine Übertragbarkeit auf hochfeste Betone wurde bisher nicht

untersucht. Voraussetzung für die Untersuchung und Beurteilung dieser Ansätze sind zunächst grundlegende Erkenntnisse zu den Dehnungsentwicklungen unter Ermüdungsbeanspruchung. Anhand der Ergebnisse der Literaturlauswertung werden folgende Arbeitsbereiche festgelegt:

- Untersuchung des Dehnungs- und Steifigkeitsverhaltens von Beton bei Ermüdungsbeanspruchung, insbesondere unter Berücksichtigung der Einflüsse ausgewählter zyklischer Beanspruchungsparameter (bezogene Oberspannung, Belastungsfrequenz, Wellenform).
- Untersuchung möglicher Zusammenhänge des Dehnungsverhaltens von Beton bei Ermüdungsbeanspruchung und monoton steigender Beanspruchung bzw. Dauerstandbeanspruchung.
- Beurteilung von Hypothesen zum Ermüdungsverhalten von Beton.

Die Ergebnisse aus den drei Arbeitsbereichen sollen abschließend in eine Modellvorstellung übertragen werden.

3.2 Untersuchung des Dehnungs- und Steifigkeitsverhaltens von Beton bei Ermüdungsbeanspruchung

Die systematische Ermittlung grundlegender Erkenntnisse zum Dehnungs- und Steifigkeitsverhalten von Beton bei Ermüdungsbeanspruchung bildet den ersten Schritt hin zu einer mechanismenorientierten Untersuchung des Betonverhaltens bei Ermüdungsbeanspruchung und stellt damit eine Abkehr von dem in der Vergangenheit überwiegend verfolgten Vorgehen des „trial-and-error“ dar. Durch den Fokus auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen sollen vorhandene Wissenslücken geschlossen und vorhandenen Unsicherheiten im Hinblick auf die Beurteilung des Ermüdungswiderstands von Beton begegnet werden.

Das Ermüdungsverhalten des hochfesten Betons wird hierzu unter Berücksichtigung der Einflüsse aus der bezogenen Oberspannung, der Belastungsfrequenz und der Wellenform untersucht. Die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen müssen im Bezug zu den Bruchlastwechselzahlen ausgewertet werden. Daher werden zunächst auch die Bruchlastwechselzahlen des hochfesten Betons und ihre Beeinflussung durch die betrachteten Belastungsparameter bezogene Oberspannung, Belastungsfrequenz und Wellenform untersucht und beschrieben. Dabei sind die Bruchlastwechselzahlen auch im Hinblick auf in der Literatur dokumentierte Ergebnisse und im Hinblick auf die in Regelwerken vorgegebenen Wöhlerkurven zu beurteilen.

Die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen und ihre Beeinflussung durch die Belastungsparameter bezogene Oberspannung, Belastungsfrequenz und Wellenform werden grundlegend

systematisch untersucht und beschrieben. Dabei wird, in Anlehnung an die in der Literatur dokumentierten Aussagen und Vermutungen, den folgenden konkreten Fragen nachgegangen:

- F1) Besteht für den hochfesten Beton ein linearer Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl bzw. der logarithmierten Belastungsdauer?
- F2) Sind weitere systematische Zusammenhänge zwischen der Dehnungsentwicklung bzw. der Steifigkeitsentwicklung und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl bzw. der logarithmierten Belastungsdauer ableitbar?
- F3) Existieren bei verschiedenen zyklischen Beanspruchungen gleiche Dehnungen oder Steifigkeiten an den Phasenübergängen? Können hieraus Hinweise auf ähnliche Gefügestände bzw. Mikrorisszustände abgeleitet werden, die im Zusammenhang mit dem Eintreten der Phasenübergänge stehen?
- F4) Zeigen die Dehnungsentwicklungen bzw. Dehnungsanteile und die Steifigkeitsentwicklung einen Bezug zur Lastwechselzahl oder zur Belastungsdauer? Können Hinweise auf zeitliche Effekte und zyklische Effekte, wie von [Awad / Hilsdorf – 1971] vermutet, abgeleitet werden?
- F5) Können von der zyklischen Beanspruchung unabhängige Grenzwerte gefunden werden, die das Versagen unter Ermüdungsbeanspruchung kennzeichnen, z. B. Bruchdehnung, prozentualer Steifigkeitsverlust?
- F6) Sind Zusammenhänge zwischen der zyklischen Beanspruchung und den Dehnungs- bzw. Steifigkeitsentwicklungen allgemeingültig ableitbar?

Die systematische Analyse der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen unter Berücksichtigung der zuvor aufgeführten konkreten Fragen stellen die Basis dar, sowohl für die kombinierte Auswertung des Dehnungsverhaltens bei Ermüdungsbeanspruchung und dem bei monoton steigender Beanspruchung bzw. bei Dauerstandbeanspruchung als auch für die Beurteilung der Hypothesen zum Ermüdungsverhalten von Beton.

3.3 Untersuchung möglicher Zusammenhänge des Dehnungsverhaltens von Beton bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten

Auf Basis umfangreicher Versuche wird untersucht, inwiefern Zusammenhänge zwischen dem Dehnungsverhalten bei Ermüdungsbeanspruchung und dem Dehnungsverhalten bei monoton steigender Beanspruchung bzw. bei Dauerstandbeanspruchung bestehen. Hierzu werden neben den Ermüdungsversuchen experimentelle Untersuchungen zum Betonverhalten bei

monoton steigender Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung durchgeführt, die hinsichtlich der Beanspruchungshöhe, der Belastungsgeschwindigkeit sowie hinsichtlich der Regelungsart aufeinander abgestimmt sind. In Anlehnung an die Literatur sollen in diesem Zusammenhang folgende Fragen untersucht werden:

- F7) Ist die Bruchdehnung infolge zyklischer Beanspruchung bei kraft geregelter Versuchsdurchführung größer, kleiner oder gleich der Bruchdehnung infolge monoton steigender Beanspruchung (Envelope-Konzept bzw. „Schädigungshypothese“ nach [Pfanner – 2003]) bzw. der Bruchdehnung bei Dauerstandbeanspruchung?
- F8) Sind Zusammenhänge zwischen der zyklischen Dehnungsentwicklung und der Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung an markanten „Zeitpunkten“ der zyklischen Dehnungsentwicklungen erkennbar? Kann ein Versagenskriterium nach dem Vorbild von [Balázs – 1994] abgeleitet werden?
- F9) Welche Relationen bestehen zwischen den Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung? Können die Dehnungsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung in Anlehnung an die Dehnungsentwicklungen bei Dauerstandbeanspruchung beschrieben werden?
- F10) Existieren an den Phasenübergängen der Dehnungsentwicklungen infolge zyklischer Beanspruchung und infolge Dauerstandbeanspruchung gleich große Dehnungen? Können hieraus Hinweise auf ähnliche Gefügestände bzw. Mikrorisszustände abgeleitet werden, die im Zusammenhang mit dem Eintreten der Phasenübergänge stehen?
- F11) Können für hochfeste Betone die für unterschiedliche Belastungsfrequenzen ermittelten Bruchlastwechselzahlen durch einen gemeinsamen funktionalen Zusammenhang beschrieben werden, wenn die Beanspruchungsniveaus bezogen auf die erhöhten Druckfestigkeiten für die in den zyklischen Versuchen auftretenden erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten ermittelt werden? Ist dieser Zusammenhang auch für sinusförmige zyklische Beanspruchungen gültig?

Anknüpfungspunkte z. B. in Form von gleichen Dehnungen zu markanten „Zeitpunkten“ könnten für die Entwicklung von Modellen genutzt werden, die das Ermüdungsverhalten von Betonen anhand des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender Beanspruchung oder Dauerstandbeanspruchung beschreiben.

3.4 Beurteilung von Hypothesen zum Ermüdungsverhalten von Beton

In der Literatur sind Hypothesen zum Ermüdungsverhalten von Beton dokumentiert, die hauptsächlich aufgrund von Auswertungen der Bruchlastwechselzahlen aufgestellt wurden. Diese Hypothesen sollen im Rahmen dieser Arbeit insbesondere vor dem Hintergrund neuer Erkenntnisse zu den Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung beurteilt werden. Auch die Erkenntnisse zu möglichen Zusammenhängen des Dehnungsverhaltens des Betons bei monoton steigender Beanspruchung und Dauerstandsbeanspruchung sollen hierfür herangezogen werden.

Folgende Hypothesen aus der Literatur zum Ermüdungsverhalten von Beton unter Druckschwellbeanspruchung sollen aufgrund der eigenen Untersuchungsergebnisse beurteilt werden:

- H1) „Geschwindigkeits-Druckfestigkeits-Hypothese“: Der Frequenzeinfluss bei Ermüdungsbeanspruchung kann auf eine unter erhöhten Beanspruchungsgeschwindigkeiten vorhandene erhöhte Druckfestigkeit zurückgeführt werden (angelehnt an [Sparks / Menzies – 1973] bzw. [Sparks – 1982], [Schneider et al. – 2012]).
- H2) „Wirkungsdauer-Hypothese“: Der Frequenzeinfluss kann auf eine verkürzte Wirkungsdauer kritischer, hoher Beanspruchungen bei erhöhten Prüffrequenzen zurückgeführt werden [Weigler / Freitag – 1975], [Klausen – 1978].
- H3) „Geschwindigkeits-Hypothese“: Die „Lastanstiegsgeschwindigkeit“ – und nicht die Dauer der Belastung unter hohen Beanspruchungen – ist ursächlich für den Einfluss der Wellenform auf die Bruchlastwechselzahlen [Weigler / Freitag – 1975].
- H4) „Doppeleffekt-Hypothese“: Bei hohen Oberspannungen ist das Ermüdungsverhalten auf einen zyklischen Effekt (abhängig vom Spannungsniveau und der Spannungsamplitude) und einen zeitlichen Effekt (abhängig von der Wirkungsdauer einer Beanspruchung einer bestimmten Höhe) zurückzuführen [Awad / Hilsdorf – 1971].
- H5) „Schädigungshypothese“: „Die im Ermüdungsprozess aufzubringende Arbeit W^{fat} , die erforderlich ist, um einen bestimmten (geschädigten) Zustand des Materials zu erreichen, entspricht genau der Arbeit W^{da} , die durch eine monotone statische Belastung aufgewendet wird, um den gleichen Schädigungszustand D herzustellen.“ ([Pfanner – 2003], S. 51).

Die im Rahmen der Ermüdungsuntersuchungen berücksichtigten Einflussparameter, bezogene Oberspannung, Belastungsfrequenz und Wellenform, wurden insbesondere auch im Hinblick auf die Überprüfung der aufgeführten Hypothesen festgelegt.

Kapitel 4

Experimentelle Untersuchungen

4.1 Konzeptionelle Überlegungen

Die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens eines hochfesten Betons steht im Fokus dieser Arbeit. Dabei ist die systematische Untersuchung der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen unter Ermüdungsbeanspruchung einer der Kernpunkte dieser Arbeit. Im Rahmen der Ermüdungsversuche werden die Einflüsse aus bezogener Oberspannung, Belastungsfrequenz und Wellenform betrachtet. Den eigenen Untersuchungen liegt dabei die Arbeitshypothese zugrunde, dass sich diese Einflüsse nicht nur anhand der Bruchlastwechselzahlen, sondern auch anhand der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen zeigen müssen.

Heutzutage stehen wesentlich bessere Möglichkeiten zur Verformungsmessung im Versuch zur Verfügung als bei früheren in der Literatur dokumentierten Untersuchungen. Verformungen können heute automatisch, kontinuierlich, mit besserer Auflösung und höheren Abtastraten erfasst werden. Diese besseren messtechnischen Möglichkeiten sollen genutzt werden, um die in Kapitel 3 zusammengestellten Fragestellungen zu untersuchen bzw. die zusammengestellten Hypothesen zu überprüfen und so neue Erkenntnisse zum Ermüdungsverhalten von Betonen, insbesondere hochfesten Betonen zu gewinnen.

Es sollen neben den Bruchlastwechselzahlen insbesondere die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung und ihre Beeinflussung durch die Belastungsparameter bezogene Oberspannung, Belastungsfrequenz und Wellenform betrachtet werden. Zusätzlich sollen mögliche Zusammenhänge des Dehnungsverhaltens bei Ermüdungsbeanspruchung und bei monoton steigender Beanspruchung bzw. bei Dauerstandbeanspruchung untersucht werden. In der Literatur sind zwar bereits einige Untersuchungen zum Dehnungsverhalten hochfester Betone bei monoton steigender Beanspruchung bzw. Dauerstandbeanspruchung dokumentiert. Um präzise Vergleiche der Dehnungsverläufe bei verschiedenen Beanspruchungsarten durchführen zu können war es jedoch erforderlich, eigene Versuche bei monoton steigender Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung an dem betrachteten hochfesten Beton durchzuführen. Hierbei galt es, hinsichtlich der Beanspruchungen und der Belastungsgeschwindigkeiten, aufeinander abgestimmte und somit möglichst konsistente Versuche durchzuführen.

Wie anhand der Literaturlauswertung in Kapitel 2 deutlich wurde, kann die Regelungsart in Versuchen einen bedeutenden Einfluss auf die ermittelten Dehnungsverläufe haben. Sollen Dehnungsverläufe miteinander verglichen werden, ist somit zunächst festzulegen bei welcher Regelungsart diese durchgeführt werden sollen. Für die vorliegende Arbeit wurden die zu vergleichenden Versuche bei gleicher Regelungsart (Kraftregelung) durchgeführt.

Durch eine zielorientierte Zuordnung der einzelnen Versuche bzw. Versuchsserien zu den verschiedenen Probekörper-Chargen sollte zudem eine möglichst unmittelbare Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse gewährleistet werden. Eine hohe Genauigkeit bei der Durchführung der Versuche, bei der Erfassung der Betonverformungen und bei der Auswertung der Versuchsdaten sind Voraussetzungen für die erfolgreiche Bearbeitung der Thematik dieser Arbeit. Die konzeptionellen Überlegungen führten zu einem umfangreichen experimentellen Untersuchungsprogramm, welches im Folgenden vorgestellt wird.

4.2 Untersucher Beton und Probekörperherstellung

Der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte hochfeste Beton wurde unter Verwendung folgender Ausgangsstoffe hergestellt:

Zement CEM I 52,5 R HS/NA, Splitt 2/8 (Granit), Sand 0/2, Flugasche, Mikrosilika-Slurry, PCE-Fließmittel, Entschäumer, Wasser

Für die experimentellen Untersuchungen wurden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von $d = 60$ mm und einer Höhe von $h = 180$ mm verwendet. Das Verhältnis des Durchmessers zur Höhe wurde zu $d/h = 1/3$ gewählt, um im mittleren Bereich der Probekörperhöhe eine möglichst unbehinderte Querdehnung zu gewährleisten. Darüber hinaus wird dieses d/h -Verhältnis ebenfalls in einigen in der Literatur dokumentierten Ermüdungsuntersuchungen verwendet (z. B. [Petković et al. – 1992], [König / Tue– 2006]), was für den Vergleich von Ergebnissen vorteilhaft ist.

Für die Betonherstellung stand ein 50 Liter Eirich-Zwangmischer zur Verfügung. Dieser ermöglichte die Herstellung von bis zu 38 Litern Beton in einer Charge. Hierzu wurden zunächst Sand, Splitt, Zement und Flugasche homogenisiert und anschließend Wasser, Mikrosilika-Slurry, Fließmittel und Entschäumer hinzugegeben. Die Gesamtmischzeit betrug hierbei sieben Minuten. Bei jeder Betonage wurde zur Kontrolle der Frischbetonqualität die Frischbetontemperatur, das Ausbreitmaß, die Frischbetonrohichte und der Luftporengehalt nach [DIN EN 12350 – 2009] bestimmt.

In jeder Charge wurden drei Würfel mit 150 mm Kantenlänge für die Prüfung der 28d-Druckfestigkeit hergestellt. Die Würfel wurden nach einem Tag ausgeschalt und bis zur Prüfung im Wasserbad gelagert. Der Mittelwert der Druckfestigkeit betrug

$f_{\text{cm,cube150}} = 116 \text{ N/mm}^2$. Der hochfeste Beton entsprach den Anforderungen der Festigkeitsklasse C80/95 nach 28 Tagen gemäß [DIN EN 206-1 – 2001]. Eine kurze statistische Auswertung der 28d-Druckfestigkeiten ist in Anhang A-1.1 enthalten.

Die Schalung für die zylindrischen Proben bestand aus PVC-Rohren mit einer Länge von jeweils 250 mm, deren Enden zwischen zwei Holzplatten verspannt waren (siehe Abbildung 4.1). Sämtliche Probekörper wurden stehend betoniert, indem der Beton mittels Schaufeln in zwei Lagen eingefüllt und jeweils 45 Sekunden auf einem Rütteltisch verdichtet wurde. Die Probekörper wurden nach der Betonage mit PE-Folie abgedeckt, um den Feuchtigkeitsverlust zu verringern, und so zwei Tage in der Schalung belassen. Anschließend wurden sie ausgeschalt und bis zur Prüfung bei Normklima (20°C / 65 % RH) gelagert.



Abbildung 4.1: Verwendete PVC-Schalung

Vor den experimentellen Untersuchungen wurden die Proben auf ca. 180 mm abgelängt, die Prüfflächen planparallel geschliffen und abschließend feingepoliert, um eine möglichst zentrische Krafteinleitung und somit eine möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung sicherzustellen. Für jede Probe wurde vor den Versuchen die Festbetonrohddichte bestimmt. Die hierbei ermittelten Abmessungen dienten bei den weiterführenden Auswertungen als Grundlage für die Ermittlung der Spannungen und Dehnungen.

In jeder Charge konnten, neben den drei Würfeln für die Feststellung der 28d-Druckfestigkeit, 34 – 39 zylindrische Probekörper hergestellt werden. Drei dieser zylindrischen Probekörper wurden jeweils zur Feststellung der 7-Tage-Druckfestigkeit als frühzeitige Kontrolle der Festbetonqualität verwendet. Somit standen pro Charge 31 – 36 Probekörper für die experimentellen Untersuchungen zur Verfügung.

Die Proben und Versuchsserien werden nach folgender Systematik bezeichnet:

Bei zyklischer Belastung:

BChargennr.-**Z**-Oberspannungsniveau-Frequenz/Belastungsgeschwindigkeit-Wellenform

z. B. B22-Z-0,90-445,3-Dr

Bei monoton steigender Belastung:

BChargennr.-**S**-Belastungsgeschwindigkeit

z. B. B22-S-445,3

Bei Dauerstandbelastung:

BChargennr.-**D**-Oberspannungsniveau-Belastungsgeschwindigkeit

z. B. B23-D-0,90-445,3

Die Versuche wurden an Proben mit einem Betonalter zwischen 28 und 100 Tagen durchgeführt, wobei die Versuche der einzelnen Versuchsreihen jeweils innerhalb von max. 3 Wochen stattfanden. Lediglich die Probekörper der Charge B19 waren zum Versuchszeitpunkt mit 515 Tagen deutlich älter als alle anderen geprüften Proben.

4.3 Genutzte Prüfmaschinen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden Versuche mit monoton steigender Beanspruchung, zyklische Versuche sowie Dauerstandversuche durchgeführt. Hierfür stand eine servohydraulische Universalprüfmaschine der Firma IST zur Verfügung (Abbildung 4.2). Diese Maschine kann mit einem 1 MN-Zylinder oder einem 10 MN-Zylinder betrieben werden. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurde der 1 MN-Zylinder verwendet. Dieser ermöglicht die Aufbringung zyklischer Belastungen verschiedener Wellenformen bei Prüffrequenzen von bis zu $f_p = 10$ Hz und darüber. Die Last wird in dieser Maschine von unten aufgebracht. Die Kraftmessdose befindet sich auf der unbewegten, oberen Seite der Maschine.

Die Anzahl Lastwechselzahl, bei deren Erreichen die zyklischen Versuche abgebrochen wurden, wurde für die Belastungsfrequenz $f_p = 10,0$ Hz zu $N = 2 \cdot 10^6$ Lastwechsel (rd. 56 Stunden) festgelegt. Bei den anderen verwendeten Belastungsfrequenzen endeten die Versuche immer mit einem Versagen nach einer überschaubaren Versuchsdauer.

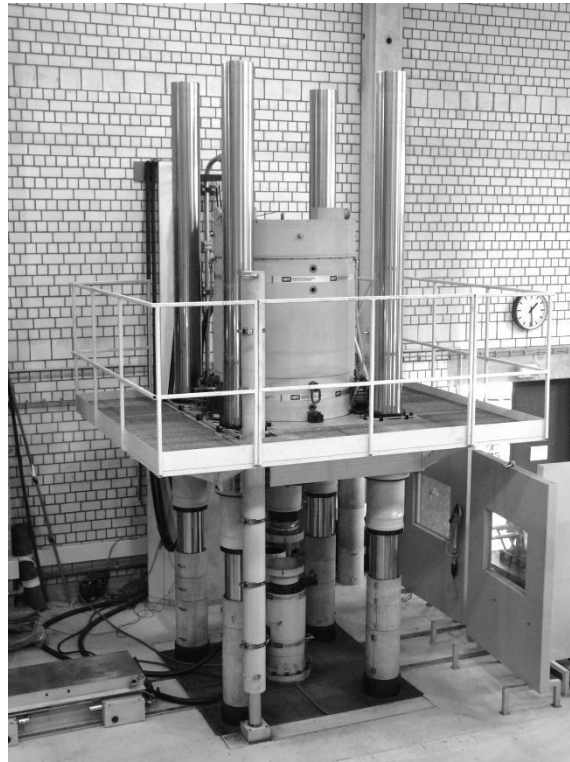


Abbildung 4.2: Universalprüfmaschine mit 1 MN-Zylinder [Lohaus / Steinborn – 2011]

Zusätzlich stand eine 5 MN-Universalprüfmaschine der Firma Toni zur Verfügung. Diese Maschine wurde ausschließlich für die Prüfung der 28d-Festigkeiten an den 150er Würfeln sowie für die Prüfung der 7d-Festigkeiten an den 60/180-Zylindern verwendet. Die Referenzdruckfestigkeiten, die als Bezugswerte der Beanspruchungsniveaus der zyklischen Versuche und der Dauerstandversuche dienten, wurden in der servohydraulischen Universalprüfmaschine geprüft.

4.4 Versuchsprogramm

4.4.1 Versuche mit monoton steigender Beanspruchung und unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten

Ziel dieser Druckversuche war es, Erkenntnisse zum Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Druckfestigkeit sowie auf die Spannungs-Dehnungslinie des hochfesten Betons zu ermitteln. Diese Versuche dienen darüber hinaus der Untersuchung eines Zusammenhangs zwischen dem Dehnungsverhalten bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung unter Berücksichtigung von Geschwindigkeitseffekten. Aus diesem Grund wurde die Belastung, wie bei den zyklischen Versuchen, kraftgeregelt aufgebracht, wobei die Belastungsge-

schwindigkeiten auf die Belastungsgeschwindigkeiten der zyklischen Versuche abgestimmt waren.

Die experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit bei monoton steigender Beanspruchung sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt. Angegeben ist jeweils die Gesamtanzahl der Versuche pro Belastungsgeschwindigkeit. In Klammern ist die Anzahl der Versuche mit Verformungsmessung vermerkt, falls diese nicht der Gesamtanzahl der Versuche entspricht.

Versuchsblock	Charge	Belastungsgeschwindigkeiten			
		92 [kN·s ⁻¹]	664 [kN·s ⁻¹]	669 [kN·s ⁻¹]	
S1	B12	3	-	-	
	B13	-	-	3	
	B14	-	3	-	
		4,453 [kN·s ⁻¹]	44,53 [kN·s ⁻¹]	445,3 [kN·s ⁻¹]	4453 [kN·s ⁻¹]
S2	B19	6	9 (5)	9 (5)	9 (5)
S3	B21	-	3	3	-
	B22	-	3	3	-
	B23	-	-	3	-

Tabelle 4.1: Übersicht über die Versuche mit monoton steigender Beanspruchung unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeiten

Versuchsblock S1

Versuchsblock S1 enthält die ersten Tastversuche. Die Belastungsgeschwindigkeiten entsprechen bei diesen Versuchen der maximalen Belastungsgeschwindigkeit bei den zugehörigen Ermüdungsversuchen mit sinusförmiger Wellenform im Versuchsblock E2 (vgl. Tabelle 4.2), die beim Durchfahren der Mittellast auftritt. Die verwendeten Belastungsgeschwindigkeiten lassen sich folgendermaßen den Versuchsserien aus Versuchsblock E2 zuordnen.

- B12: $\dot{k} = 90 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ B12-Z-0,80-0,1-Sin
- B13: $\dot{k} = 669 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ B13-Z-0,80-1,0-Sin
- B14: $\dot{k} = 664 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ B14-Z-0,80-1,0-Sin

Die Tastversuche des Versuchsblocks S1 waren Teil eines vom BMU geförderten Verbundforschungsprojektes [Grünberg / Oneschkow – 2011].

Versuchsblock S2

Im Rahmen von Versuchsblock S2 folgten systematische experimentelle Untersuchungen bei einer erhöhten Probekörperanzahl. Diese Versuche dienten der grundlegenden Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Druckfestigkeitssteigerung und der Belastungsgeschwindigkeit sowie der Untersuchung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Bruchdehnungen und Dehnungen bei Maximallast des hochfesten Betons. Hierfür waren vier Belastungsgeschwindigkeiten vorgesehen. Diese entsprachen den beiden in Versuchsblock E4 (zyklische Versuche) vorgesehenen Belastungsgeschwindigkeiten $\dot{k} = 44,53 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ und $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$, sowie jeweils einer um Faktor 10 höheren und niedrigeren Belastungsgeschwindigkeit.

Die untersuchten Belastungsgeschwindigkeiten wurden unter Berücksichtigung des in Abbildung 2.9 dargestellten Zusammenhangs zwischen der Druckfestigkeitssteigerung und der Belastungsgeschwindigkeit festgelegt. Änderungen der Druckfestigkeit sind demnach, bei Beanspruchungsgeschwindigkeiten im für Ermüdungsbeanspruchungen relevanten Bereich, nur bei Änderungen der Beanspruchungsgeschwindigkeit um mindestens Faktor 10 relativ sicher feststellbar.

Versuchsblock S3

Die Versuche aus Versuchsblock S3 dienten der Feststellung der erhöhten Druckfestigkeiten sowie der Spannungs-Dehnungslinien für erhöhte Belastungsgeschwindigkeiten, wobei eine unmittelbare Vergleichbarkeit mit den zyklischen Versuchen aus Block E4 sichergestellt werden sollte. Die Belastungen wurden bei den gleichen Belastungsgeschwindigkeiten von $\dot{k} = 44,53 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ und $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ aufgebracht wie sie im Versuchsblock E4 (zyklische Versuche) verwendet wurden. Darüber hinaus wurden Proben der gleichen Chargen wie im Versuchsblock E4 verwendet. Auf diese Weise wurde eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse der Versuche mit monoton steigender und zyklischer Beanspruchung gewährleistet.

4.4.2 Ermüdungsversuche

Im Rahmen dieser Arbeit wurden ausschließlich einaxiale Druckschwellversuche als Einstufenversuche, d. h. ohne Wechsel der Beanspruchungsparameter während des Versuchs, durchgeführt. Die bezogene Unterspannung war bei sämtlichen Versuchen mit $S_U = 0,05$ gleich groß. Die zyklische Belastung wurde bei allen Versuchen kraftregelt aufgebracht,

wobei zunächst die Mittellast mit einer Belastungsgeschwindigkeit von $5 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ und anschließend die zyklische Amplitude aufgebracht wurde.

Bei den Ermüdungsuntersuchungen wurden die zyklischen Beanspruchungen als bezogene Ober- und Unterspannungen festgelegt. Die maximalen und minimalen Prüfkraft F_O und F_U wurden dann unter Berücksichtigung der mittleren Referenzdruckfestigkeit der jeweiligen Charge ermittelt. Als Bezugswert für die Ermittlung der bezogenen Ober- und Unterspannung diente die einaxiale Druckfestigkeit, die unmittelbar vor den Ermüdungsversuchen als Mittelwert der Druckfestigkeiten dreier Proben derselben Charge und mit derselben Probekörpergeometrie wie die Proben für die Ermüdungsversuche ermittelt wurde (Referenzversuche). Hierzu wurden die Proben wegeregelt bei einer Prüfgeschwindigkeit von $\dot{w} = 0,20 \text{ mm/min}$ bis zum Bruch belastet. Diese Belastungsgeschwindigkeit lag im vorgegebenen Bereich der Belastungsgeschwindigkeiten bei Prüfung von Druckfestigkeiten nach [DIN EN 12390-3 – 2009].

Die Festigkeitsentwicklung hochfester Betone ist in einem Betonalter größer 28 Tagen nahezu abgeschlossen [König et al. – 2001]. Dies wurde in Tastversuchen auch für den hier untersuchten Beton bestätigt. Darüber hinaus betrug die Gesamtdauer einer Versuchsserie maximal 2 Wochen. Aufgrund der zu erwartenden geringen weiteren Festigkeitsentwicklung und der kurzen Gesamtdauer der Versuchsserien wurde auf die Feststellung der Druckfestigkeiten nach Abschluss der jeweiligen Versuchsserie verzichtet.

Es ist allgemein bekannt, dass die Bruchlastwechselzahlen von Beton deutliche Streuungen aufweisen. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass auch die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen entsprechend streuen. Um trotzdem eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen zu erreichen, wurden die zu vergleichenden Versuche jeweils der gleichen Probekörpercharge zugeordnet und so ein Chargeneinfluss auf die Ergebnisse ausgeschlossen. Anders als bei dem größten Teil der Veröffentlichungen im Bereich Betonermüdung wird die Chargenzuordnung in dieser Arbeit daher immer präsent sein. Ergänzend waren Vergleichsversuche bei einer bezogenen Oberspannung von $S_O = 0,80$ und einer Belastungsgeschwindigkeit von $f_P = 1,0 \text{ Hz}$ vorgesehen, um Chargeneinflüsse beurteilen zu können,

Für jede zyklische Beanspruchung wurden mindestens fünf Versuche, in der Regel sechs Versuche durchgeführt. Als zyklische Beanspruchung wird hier die Kombination aus Beanspruchung (Oberspannung und Unterspannung), Prüffrequenz und Wellenform verstanden. Die experimentellen Untersuchungen mit Beanspruchungsniveaus, bei denen Durchläufer auftraten, wurden nach dem Auftreten von drei Durchläufern abgebrochen.

Die durchgeführten Ermüdungsversuche lassen sich in vier Versuchsblöcke unterteilen. Diese Versuchsblöcke unterscheiden sich hinsichtlich ihrer konkreten Zielausrichtung und daher auch hinsichtlich ihrer Konzeption. Tabelle 4.2 enthält eine Übersicht über die durchgeführten

zyklischen Untersuchungen. In Tabelle 4.2 sind die Belastungsgeschwindigkeiten nur für die zyklischen Versuche mit dreiecksförmiger Beanspruchung angegeben, da sie bei sinusförmiger Beanspruchung nicht abschnittsweise konstant sind.

Versuchsblock	Charge	Wellenform	Frequenz f_p [Hz]	Geschwindigkeit [kN s ⁻¹]	Bemerkung	Anzahl der Versuche für die bezogenen Oberspannungen S_0				
						0,95	0,90	0,80	0,70	0,60
E1	B1	Sin	10,0	-	A					3 ^d
	B2	Sin	10,0	-	A			6	6	
E2	B12	Sin	1,0	-	-			6		
		Sin	0,1	-	-	6	6	7		
	B13	Sin	10,0	-	-			6		
		Sin	10,0	-	A			6		
		Sin	1,0	-	-			6		
	B14	Sin	1,0	-	-	6	6	7		
E3	B18	Sin	5,0	-	-	8	8	8	8	
E4	B21	Sin	1,0	-	-			6		
		Sin	0,1	-	-			6		
		Dr	1,0	445,3	-			7		
		Dr	0,1	44,53	-			7		
	B22	Sin	0,89	-	-		8			
		Sin	0,09	-	-		7			
		Dr	0,89	445,3	-		6			
		Dr	0,09	44,53	-		6			
	B23	Dr	0,86	445,3	-		6			
		Dr	0,98	445,3	-			6		
		Dr	9,76	4453	-			5		

A: Aufspannen der Amplitude über 100 Lastwechsel d: Durchläufer

Tabelle 4.2: Übersicht über die Ermüdungsversuche

Versuchsblock E1

Der erste Versuchsblock E1 beinhaltet die experimentellen Untersuchungen im High-Cycle-Fatigue-Bereich mit einer Belastungsfrequenz von $f_p = 10,0$ Hz. Das heißt, es handelt sich um Versuchsserien, bei denen der überwiegende Teil der Versuche zu Bruchlastwechselzahlen größer als 10^4 Lastwechsel führte. Bei diesen Versuchen lag das Hauptaugenmerk auf der grundlegenden Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit des hochfesten Betons bzw. auf der Einordnung des untersuchten hochfesten Betons im Vergleich zu Ergebnissen aus der Literatur sowie im Vergleich zu den Vorgaben des Model Codes 90 [CEB-FIP - 1993], des Model Codes 2010 [fib – 2013] sowie des Eurocode 2 [DIN EN 1992-1-1 – 2011] bzw. [DIN EN 1992-2 – 2010].

Es wurden bezogene Oberspannungen von $S_O = 0,80; 0,70$ und $0,60$ untersucht. Die Wellenform war sinusförmig (im Folgenden auch kurz „Sinusversuch“ genannt). Bei den Versuchen des Blocks E1 wurde die Amplitude der sinusförmigen Beanspruchung jeweils bis zum Erreichen des vorgegebenen Wertes linear gesteigert. Das Aufspannen der Amplitude erfolgte über 100 Lastwechsel. Aufgrund der hohen Prüffrequenz und aufgrund des Aufspannens der Amplitude zu Beginn der zyklischen Beanspruchung war die Untersuchung höherer Oberspannungsniveaus wegen der dann relativ kleinen Bruchlastwechselzahlen nicht sinnvoll.

Versuchsblock E2

Von in der Literatur dokumentierten Untersuchungen ist bekannt, dass sich bei normalfesten Betonen ein Frequenzeinfluss auf die Bruchlastwechselzahlen bei hohen bezogenen Oberspannungen zeigt (vgl. Abschnitt 2.2.5). Zur Untersuchung eines Einflusses der Prüffrequenz auf die Bruchlastwechselzahlen und auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen beinhaltete Versuchsblock E2 daher Versuche im Bereich des Low-Cycle-Fatigue, d. h. Versuche bei hohen bezogenen Oberspannungen, niedrigeren Belastungsfrequenzen und relativ niedrigen Bruchlastwechselzahlen. Es wurden bezogene Oberspannungen von $S_O = 0,95; 0,90; 0,80$ und $0,70$ untersucht, wobei die Prüffrequenzen in Anlehnung an die Literatur $f_p = 0,1; 1,0$ und $10,0$ Hz betragen (vgl. Abschnitt 2.2.5). Die zyklische Beanspruchung war auch bei diesen Versuchen sinusförmig.

Aufgrund der niedrigeren Prüffrequenzen und der hohen Oberspannungsniveaus waren kleinere Bruchlastwechselzahlen zu erwarten als bei den Versuchen des Blocks E1. Zusätzlich sollten insbesondere auch die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen ausgewertet werden. Aus beiden Gründen wurde die Amplitude jeweils vollständig im ersten Lastwechsel aufgebracht. Zur Untersuchung des Einflusses des Aufspannens der Amplitude auf die Bruchlastwechselzahlen und somit zur Abschätzung der Vergleichbarkeit der Versuche aus den Blöcken E1 und E2, wurden vergleichende Versuche mit und ohne Aufspannen der Amplitude bei einer Prüffrequenz von $f_p = 10,0$ Hz durchgeführt.

Da der Fokus bei diesen Untersuchungen auf den Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen lag, wurde auf die genaue messtechnische Erfassung der Verformung in den Hoch- und Tiefpunkten der zyklischen Belastung (Peaks) besonderer Wert gelegt.

Versuchsblock E3

Dieser Versuchsblock beinhaltet sinusförmige Versuche, die bei einer Prüffrequenz von $f_p = 5,0$ Hz und bezogenen Oberspannungen im Bereich von $S_O = 0,95 - 0,70$ durchgeführt wurden. Diese stellen insofern sowohl hinsichtlich der Prüffrequenz als auch hinsichtlich der Oberspannungsniveaus ein Bindeglied zwischen den Versuchen aus Block E1 und Block E2 dar. Bei diesen Versuchen wurde die Amplitude ebenfalls vollständig im ersten Lastwechsel aufgebracht. Im Fokus der Versuche des Versuchsblocks E3 standen die Bruchlastwechselzahlen.

Versuchsblock E4

Versuchsblock E4 diente der Untersuchung möglicher Zusammenhänge zwischen dem Dehnungsverhalten bei zyklischer und monoton steigender Beanspruchung bzw. zwischen dem Dehnungsverhalten bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung unter Berücksichtigung der Belastungsgeschwindigkeit. Des Weiteren werden diese Versuche zur Überprüfung der „Geschwindigkeits-Druckfestigkeits-Hypothese“ herangezogen.

Um eine unmittelbare Vergleichbarkeit zu den Versuchen mit monoton steigender Beanspruchung aus Block S3 aufgrund gleicher, konstanter Belastungsgeschwindigkeiten zu erreichen, wurden zyklische Versuche mit dreiecksförmiger Wellenform (im Folgenden auch kurz „Dreiecksversuche“ genannt) durchgeführt, für die abschnittsweise konstante Be- und Entlastungsgeschwindigkeiten charakteristisch sind. Ergänzend waren somit Sinusversuche erforderlich, um den zusätzlichen Einfluss der Wellenform zu untersuchen.

Die beiden gewählten Beanspruchungsniveaus $S_O = 0,90$ und $S_O = 0,80$ wurden auf die zyklischen Beanspruchungsniveaus aus Block E2 und auf die Beanspruchungen der Dauerstandversuche aus Block D1 abgestimmt. Anders als in Block E2 wurden verschiedene Prüffrequenzen jeweils einer Charge zugeordnet. Die Prüffrequenzen unterscheiden sich um den Faktor 10, um deutliche Einflüsse auf die Dehnungsentwicklungen feststellen zu können. Die Amplitude wurde bei diesen Versuchen jeweils vollständig im ersten Lastwechsel aufgebracht. Die zyklischen Beanspruchungen waren zwischen den Versuchsserien dieses Versuchsblocks und denen der anderen Versuchsblöcke abgestimmt. Die Beanspruchungsniveaus und Belastungsfrequenzen wurden folgendermaßen festgelegt:

Für die Versuche bei $S_O = 0,80$ (Charge B21) sind die gleichen Prüffrequenzen $f_p = 0,1$ Hz und $f_p = 1,0$ Hz, die in Versuchsblock E2 verwendet wurden, festgelegt worden, wobei die Versuche mit sinusförmiger und dreiecksförmiger Belastung paarweise die gleiche Belas-

tungsfrequenz aufweisen (vgl. Tabelle 4.2). Für die Dreiecksversuche ergeben sich aus dieser Festlegung konstante Prüfgeschwindigkeiten von $\dot{k} = 44,53 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ und $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$.

Für die Dreiecksversuche bei $S_O = 0,90$ (Charge B22) wurden diese beiden Belastungsgeschwindigkeiten übernommen. Hieraus ergeben sich, aufgrund der größeren Amplitude bei gleich bleibender Belastungsgeschwindigkeit, etwas kleinere Prüffrequenzen von $f_p = 0,089 \text{ Hz}$ und $f_p = 0,89 \text{ Hz}$ als bei den Versuchen mit $S_O = 0,80$. Der prinzipielle Zusammenhang ist in Abbildung 4.3 dargestellt schematisch.

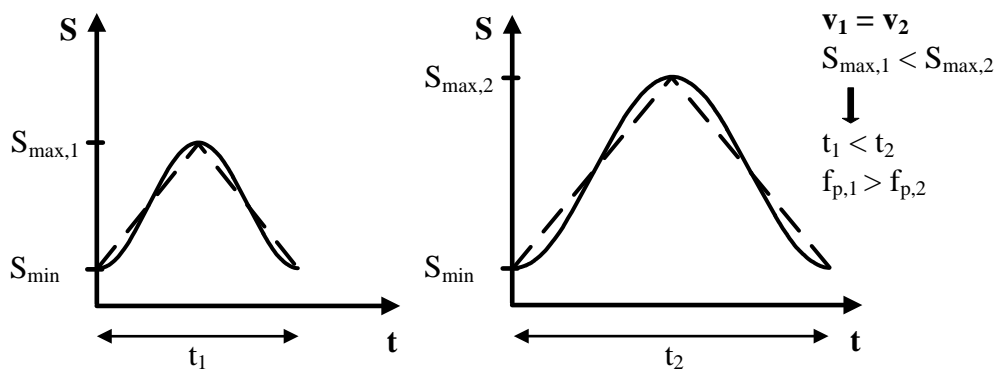


Abbildung 4.3: Zusammenhang zwischen Beanspruchungsniveau, Belastungsgeschwindigkeit und Belastungsfrequenz

Der Einfluss der bezogenen Oberspannung bei dreiecksförmiger Belastung kann bei der gewählten Versuchseinteilung nicht ohne möglichen Chargeneinfluss untersucht werden. Daher wurden in diesem Versuchsblock ergänzend entsprechende Versuche für $S_O = 0,80$ und $S_O = 0,90$ durchgeführt (Charge B23). Die Belastungsgeschwindigkeit wurde bei diesen Versuchen mit $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ konstant gehalten, sodass sich etwas unterschiedliche Prüffrequenzen von $f_p = 0,86 \text{ Hz}$ und $f_p = 0,98 \text{ Hz}$ für die beiden Oberspannungsniveaus ergeben. Die Versuche bei der höchsten Belastungsfrequenz $f_p = 9,76 \text{ Hz}$ orientieren sich an den Versuchen der Blöcke 1 und 2 mit einer Prüffrequenz von $f_p = 10,0 \text{ Hz}$.

Wie auch bei den Versuche aus Block E2 wurde die gewählte Messfrequenz jeweils entsprechend der Belastungsfrequenz bzw. der Belastungsgeschwindigkeit und entsprechend der Wellenform der zyklischen Belastung so gewählt, dass die Peaks der Axialverformungen bei Ober- und Unterspannung genau erfasst werden konnten.

Die Versuche der Blöcke E1, E2 und E3 waren Teil eines vom BMU geförderten Verbundforschungsprojektes [Grünberg / Oneschkow – 2011].

4.4.3 Dauerstandversuche bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten

Zur Untersuchung eines Zusammenhangs zwischen dem Dehnungsverhalten bei zyklischer Beanspruchung und dem bei Dauerstandbeanspruchung, wurden im Rahmen des Versuchsblocks D1 Dauerstandversuche durchgeführt. Wie in Abschnitt 2.4.2 beschrieben wurde, zeigen die Untersuchungen von [Whaley / Neville – 1973], dass sich die Dehnungen bei Ermüdungsbelastungen mit hohen Oberspannungsniveaus nicht aus einem Dehnungsanteil infolge konstanter Mittellast und einem Dehnungsanteil infolge der Amplitude zusammensetzen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein anderer Ansatz verfolgt.

Durchgeführt wurden Dauerstandversuche bei zwei hohen bezogenen Spannungsniveaus von $S_D = 0,90$ und $S_D = 0,80$, die den untersuchten Oberspannungsniveaus in den Ermüdungsversuchen des Blocks E4 entsprachen (vgl. Tabelle 4.2). Als Basis der Vergleiche der Dehnungsentwicklungen infolge Dauerstandbeanspruchung und der Dehnungsentwicklungen bei Oberspannung besteht somit die gleiche bezogene Beanspruchung und somit eine vergleichbare „Höhenlage“ der Dehnungsentwicklungen. Als Bezugswert der Beanspruchungsniveaus diente wie bei den zyklischen Versuchen der Mittelwert der Referenzdruckfestigkeiten, die bei einer Geschwindigkeit von $\dot{w} = 0,20$ mm/min ermittelt wurden.

Für die Dauerstandversuche wurden ebenfalls Proben der Charge B23 verwendet, um so eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Dehnungsentwicklungen sicherzustellen. Die Versuche wurden, wie die zyklischen Versuche, kraft geregelt durchgeführt. Die Aufbringung der jeweiligen Maximallast erfolgte mit den bei den Dreiecksversuchen gewählten Belastungsgeschwindigkeiten $\dot{k} = 44,53$ kN · s⁻¹ und $\dot{k} = 445,3$ kN · s⁻¹. Anschließend wurde die jeweilige Beanspruchung bis zum Versagen der Probe bzw. bis zum Abbruch des Versuchs konstant gehalten. Die gewählte Art der Versuchsdurchführung weicht hinsichtlich der Geschwindigkeit der Lastaufbringung von den in der Literatur beschriebenen Untersuchungen ab (vgl. Abschnitt 2.3). Diese Modifikationen wurden bewusst vorgenommen, um Dauerstandversuche durchzuführen, die möglichst gut mit Ermüdungsversuchen vergleichbar sind. Die durchgeführten Dauerstandversuche sind in Tabelle 4.3 zusammengestellt.

Versuchsblock	Charge	Oberspannungsniveau S_D	Belastungsgeschwindigkeit	
			44,53 [kN · s ⁻¹]	445,3 [kN · s ⁻¹]
D1	B23	0,80	3	2
		0,90	3	3

Tabelle 4.3: Übersicht über die Dauerstandversuche

Das gewählte Zeitlimit der Dauerstandbelastung betrug in Anlehnung an die Dauer der zyklischen Vergleichsversuche ca. 14 Stunden. Trat in diesem Zeitraum kein Versagen auf, so wurden anschließend die Restfestigkeiten ermittelt. Dabei wurde die Probe zunächst bis auf 20 kN entlastet und die Belastung anschließend, wie bei den Referenzversuchen weggeregelt, mit einer Geschwindigkeit von $\dot{w} = 0,20 \text{ mm/min}$ bis zum Bruch gesteigert.

4.5 Versuchsaufbau und Messtechnik

Der Versuchsaufbau war bei den Versuchen mit monoton steigender Beanspruchung, bei den zyklischen Versuchen und bei den Dauerstandversuchen gleich. Der Versuchsaufbau in der servohydraulischen Universalprüfmaschine ist in Abbildung 4.4 dargestellt.



Abbildung 4.4: Versuchsaufbau in der servohydraulischen Universalprüfmaschine

Die Proben wurden unter Verwendung einer unterhalb des Probekörpers angeordneten Kalotte geprüft. Die obere Druckplatte war fest. Die Erfassung der Maschinenkraft und des Maschinenwegs während der Versuche war obligatorisch. Die Erfassung der Axialverformungen der Proben erfolgte kontinuierlich mittels drei um 120° versetzter Laserdistanzsensoren. Es wurden Laserdistanzsensoren des Typs OWLG der Firma Welotec verwendet. Diese besitzen einen Messbereich von 10 mm und ermöglichen eine Messfrequenz von bis zu 1100 Hz. Die Auflösung betrug 0,002 mm.

Aus früheren Untersuchungen, die am Institut für Baustoffe durchgeführt wurden [Anders / Lohaus – 2007], ist bekannt, dass es während Ermüdungsversuchen in Abhängigkeit von dem Beanspruchungsniveau und der Belastungsfrequenz zum Anstieg der Temperatur des Probekörpers kommen kann. Um die Verformungen infolge eines Temperaturanstiegs der Proben während der Versuche bei der Auswertung der Versuche näherungsweise berücksichtigen zu können, wurde die Oberflächentemperatur der Proben mittels eines Infrarotsensors

der Firma Heraeus mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ erfasst. Auf die Messung der Temperaturen im Inneren der Proben über einbetonierte Sensoren wurde verzichtet, um die damit verbundenen Störungen des Betongefüges und eine mögliche Beeinflussung des Ermüdungsverhaltens zu vermeiden.

Bei den hier durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurde die Beanspruchung außer in den Referenzversuchen kraftgeregelt aufgebracht. Das bedeutet: Die Lastaufbringung wird, vereinfacht dargestellt, über einen permanenten Abgleich von dem Soll-Signal und dem Ist-Signal der Kraft geregelt. Ein elementarer Bestandteil dieser Regelung ist die Kraftmessdose, die das Ist-Signal der Kraft liefert. Bei den durchgeführten Versuchen wurde eine 1 MN-Kraftmessdose verwendet. Diese ist kalibriert und entspricht der Genauigkeitsklasse 0,5 nach [DIN EN ISO 7500-1 – 1999]. Die mögliche Abweichung des Ist-Signals der Kraft beträgt 0,5 %, was bei einer 1 MN-Kraftmessdose einer Kraft von $\pm 5 \text{ kN}$ entspricht.

Zur Messwerterfassung wurde ein separater Rechner und ein Messverstärker „Spider 8“ der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH mit einer Trägerfrequenz von 4,8 kHz verwendet. Messverstärker dienen der Umwandlung des elektrischen Eingangssignals in physikalische Messgrößen. Hierzu wurde die Kalibrierung vor Beginn der Versuche überprüft und falls erforderlich angepasst. Die Messgrößen wurden während der Versuche kontinuierlich erfasst, wobei die Datenerfassungsrate je nach Prüffrequenz bzw. Prüfgeschwindigkeit festgelegt wurde. Insbesondere bei den zyklischen Versuchen, für die die Dehnungsentwicklungen detailliert ausgewertet werden sollten, wurde die Datenerfassungsrate so hoch festgelegt, dass ausreichend Datenpunkte auch im Bereich der Belastungspeaks ermittelt werden konnten. Die maximale Datenerfassungsrate betrug 1100 Hz. Höhere Datenerfassungsraten waren aufgrund der begrenzten Messfrequenz der eingesetzten Laser nicht sinnvoll.

Wie bereits zuvor beschrieben wurde, wurde bei den Dauerstandversuchen die Belastung bis zum Erreichen des jeweils festgelegten Beanspruchungsniveaus mit zwei hohen Belastungsgeschwindigkeiten gesteigert. Um die Dehnung beim Erreichen des festgelegten Beanspruchungsniveaus gut erfassen zu können, waren bei diesen Versuchen im Vergleich zu üblichen Dauerstandversuchen sehr hohe Abtastraten von 100 Hz bzw. 300 Hz vorgesehen.

Insgesamt konnten umfangreiche Messdaten gewonnen werden, die für die weiteren analytischen Untersuchungen zunächst aufbereitet werden mussten.

4.6 Messdatenauswertung und -aufbereitung

4.6.1 Bruchlastwechselzahlen

Ermüdungsbeanspruchungen mit unterschiedlichen zyklischen Beanspruchungen können zu einer großen Bandbreite von Bruchlastwechselzahlen N_f führen. Die Bruchlastwechselzahlen werden daher der besseren Darstellbarkeit halber oft als logarithmierte Werte $\log N_f$ in Wöhlerdiagrammen dargestellt. Zu beachten ist, dass hierdurch Differenzen von Bruchlastwechselzahlen mit steigender Größenordnung der Bruchlastwechselzahlen zunehmend gestaucht dargestellt werden. Bei der Bewertung und Interpretation der ermittelten Bruchlastwechselzahlen und der Einflüsse auf die Bruchlastwechselzahlen werden die Zahlen N_f daher im Folgenden immer mitbetrachtet.

Bruchlastwechselzahlen von Beton weisen im Allgemeinen erhebliche Streuungen auf. Die Bruchlastwechselzahlen werden daher im Weiteren, wie im Allgemeinen üblich, größtenteils als Mittelwerte ausgewertet und für Vergleiche verwendet. Zur Bewertung der Versuchsergebnisse vor dem Hintergrund der Streuungen, wie z. B. bei der Bewertung der Einflüsse auf die Bruchlastwechselzahlen oder zur Bewertung von Chargeneinflüssen, werden daher zusätzlich statistische Verfahren angewendet.

Für Versuche, bei denen die zyklische Belastung zu Beginn innerhalb einer bestimmten Anzahl an Lastwechseln gesteigert wurde (Aufspannen der Amplitude), werden die hierfür benötigten Lastwechsel, auf der sicheren Seite liegend, nicht bei den Auswertungen berücksichtigt. Die Lastwechsel sind dementsprechend in den angegebenen Bruchlastwechselzahlen nicht enthalten.

4.6.2 Dehnungen und Dehnungsentwicklungen

Bei der Auswertung und Aufbereitung der Messdaten lag der Fokus auf der Bestimmung der Dehnungsentwicklungen für die verschiedenen Beanspruchungsarten. Bei der Auswertung der Spannungs-Dehnungslinien infolge monoton steigender Beanspruchung werden die gemessenen Verformungen üblicherweise von den Verformungen infolge des anfänglichen Anpressens bereinigt (vgl. z. B. [Schickert – 1980], [Grübl et al. - 2001]). Dieses Vorgehen wurde bei der Auswertung der Dehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung, Ermüdungsbeanspruchung und Dauerstandbeanspruchung übernommen. Es wird im Folgenden ausschließlich mit den bereinigten Dehnungen und Dehnungsentwicklungen gearbeitet.

Bei der Auswertung der zyklischen Versuche wurden die ermittelten Messdaten zunächst gefiltert und so die Daten der Axialverformungen in den Peaks jedes Lastwechsels ermittelt. Auf Grundlage dieser Daten wurden die axialen Dehnungen bei Ober- und Unterspannung unter Berücksichtigung der Abmessungen jedes einzelnen Probekörpers bestimmt.

Wie bereits zuvor berichtet, ist mit einer Erwärmung des Probekörpers im Ermüdungsprozess zu rechnen. Diese Erwärmung ist abhängig von der Höhe der Beanspruchung und der Belastungsfrequenz. Infolge der Erwärmung dehnt sich die Probe aus. Die Erwärmung wirkt somit entgegengesetzt der über den Ermüdungsprozess akkumulierten Dehnung bzw. Stauchung, sodass die tatsächliche, durch die Belastung erzeugte Axialverformung der Probe größer ist, als die messtechnisch erfasste. Dehnungsanteile infolge Temperaturerhöhung wurden daher bei der Auswertung der Dehnungen berücksichtigt. Zur Berechnung der Temperaturdehnung wurde die gemessene Oberflächentemperatur sowie die Wärmedehnzahl für Beton von $\alpha_T = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ herangezogen. Aufgrund der relativ kleinen Temperaturerhöhungen von weniger als 10 K in den auf die Dehnungsentwicklungen fokussierten Versuchen ist dieses Vorgehen in erster Näherung ausreichend.

Wie bei den Bruchlastwechselzahlen wird auch bei den Dehnungsentwicklungen erwartet, dass diese streuen werden. Um chargenbedingte Streuungen möglichst auszuschließen und so eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Versuche zu gewährleisten, wurden die Versuche so geplant, dass die untersuchten Einflüsse jeweils unter Verwendung von Proben einer Charge untersucht wurden. Darüber hinaus wurden die gleichen Einflüsse auch bei Kombinationen mit anderen Beanspruchungsparametern unter Verwendung anderer Chargen betrachtet. Eine Verallgemeinerung grundlegender einflussbedingter Zusammenhänge ist somit trotzdem möglich, wenn ähnliche oder zusammenführbare Ergebnisse zu einem untersuchten Einfluss bei verschiedenen Chargen und Beanspruchungen ermittelt werden konnten.

4.6.3 Statistische Methoden

Die nicht vermeidbaren Streuungen der Bruchlastwechselzahlen und der Dehnungen sind sowohl zwischen den verwendeten Chargen als auch innerhalb der Chargen zwischen den einzelnen Proben zu erwarten. Im Rahmen der eigenen Auswertungen werden daher chargenbedingte Einflüsse auf die Untersuchungsergebnisse sowie die Auswirkung der untersuchten Einflüsse auf die Bruchlastwechselzahlen und auf ausgewählte Kenngrößen der Dehnungsverläufe mithilfe statistischer Verfahren bewertet.

Die Druckfestigkeiten von Beton werden durch Normalverteilungen angenähert. Basierend auf einigen früheren Untersuchungen (z. B. [Klausen – 1978], [Weigler / Freitag – 1975]) wird im Allgemeinen angenommen, dass die logarithmierten Bruchlastwechselzahlen $\log N_f$ ebenfalls normalverteilt sind [CEB – 1988], [Petković et al. – 1992]. Auch die eigenen statistischen Auswertungen basieren daher auf dieser Grundannahme.

Die Zuverlässigkeit der Aussagen statistischer Methoden ist abhängig von dem für die Auswertung zur Verfügung stehenden Stichprobenumfang. Je nach Beanspruchungsart wurden bei den hier dokumentierten experimentellen Untersuchungen zwischen drei und neun Wiederholungsversuche durchgeführt. Das sind größtenteils deutlich mehr Wiederholungsversuche als sie in entsprechenden, in der Literatur dokumentierten Untersuchungen durchgeführt

wurden. Im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Ergebnisse der statistischen Auswertungen ist der zur Verfügung stehende Stichprobenumfang jedoch eher klein. Folglich werden die Ergebnisse der durchgeführten statistischen Auswertungen nur als Hinweise interpretiert.

Zur Beurteilung, ob die in den Versuchen festgestellten Unterschiede der Bruchlastwechsellasten oder ausgewählter Kenngrößen der Dehnungsverläufe zwischen den Stichproben signifikant sein könnten, wurden F-Tests zur Prüfung der Homogenität der Varianzen und t-Tests zur Prüfung der Homogenität der Mittelwerte durchgeführt. Auf die Ergebnisse dieser statistischen Auswertungen wird an den entsprechenden Textstellen verwiesen.

F-Test, bei kleinem bis mittlerem Stichprobenumfang [Sachs – 1978]:

$$\hat{F} = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad \text{mit} \quad FG_1 = n_1 - 1 = \nu_1 ; FG_2 = n_2 - 1 = \nu_2 \quad (4.1)$$

Mit: FG Freiheitsgrad der Stichprobe
 n Stichprobenumfang
 s² Varianz der Stichprobe

Die Nullhypothese gleicher Varianzen wird verworfen, wenn die berechnete Prüfgröße \hat{F} größer ist, als der für das festgelegte Signifikanzniveau tabellierte Wert f . Wird der F-Test als Vortest für den Vergleich der Mittelwerte verwendet, sollte für den F-Test das 10 %-Signifikanzniveau verwendet werden [Sachs – 1978]. Der F-Test wird daher als einseitiger Test auf dem 10 %-Signifikanzniveau durchgeführt.

Zweistichproben-t-Test, Fall 1: Ungleiche Stichprobenumfänge und gleiche Varianzen [Sachs – 1978]

$$\hat{t} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\left[\frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2} \right] \cdot \left[\frac{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right]}} \quad \text{mit} \quad FG = n_1 + n_2 - 2 \quad (4.2)$$

Zweistichproben-t-Test, Fall 2: Ungleiche Stichprobenumfänge und ungleiche Varianzen [Sachs – 1978]

$$\hat{t} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad \text{mit} \quad FG = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2} \right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} \right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2} \right)^2}{n_2 - 1}} \quad (4.3)$$

Mit:	FG	Freiheitsgrad der Stichprobe
	n	Stichprobenumfang
	s^2	Varianz der Stichprobe
	\bar{x}	Mittelwert der Stichprobe

Überprüft wird die Nullhypothese, dass die verglichenen Mittelwerte gleich sind. Ist die berechnete Prüfgröße \hat{t} größer als der für das festgelegte Signifikanzniveau tabellierte Wert t , so wird die Nullhypothese abgelehnt und von signifikant unterschiedlichen Mittelwerten ausgegangen. Der t-Test wird als zweiseitiger Test auf dem 5%-Signifikanzniveau durchgeführt.

Ein abweichendes Vorgehen wurde bei Vergleichen von Merkmalen aus Versuchen mit monoton steigender und zyklischer Beanspruchung gewählt. Aufgrund des sehr kleinen Stichprobenumfangs der meisten Versuchsserien mit monoton steigender Beanspruchung wurden hierbei Unterschreitungswahrscheinlichkeiten berechnet und diese zur vergleichenden Bewertung der Ausprägung der Merkmale herangezogen.

Die Ergebnisse statistischer Auswertungen von Stichproben mit kleinem Umfang sind besonders anfällig für ggf. enthaltene Ausreißer. Gleichzeitig ist eine möglichst zuverlässige Identifizierung eines Ausreißers umso schwieriger, je kleiner der Stichprobenumfang ist. Eine Berücksichtigung eines nicht erkannten Ausreißers kann dabei genauso zu falschen Rückschlüssen aus einer statistischen Untersuchung führen wie ein fälschliches Entfernen eines vermeintlichen Ausreißers. Gleichzeitig beziehen sich die durchgeführten statistischen Untersuchungen auf verschiedene Merkmale der Stichproben (Bruchlastwechselzahlen, Kenngrößen der Dehnungen). So können, je nach untersuchtem Merkmal, andere potentielle Ausreißer-Proben identifiziert werden. Der Mehrwert der Nichtberücksichtigung vermeintlicher Ausreißer für die Interpretation der Ergebnisse ist aufgrund der möglicherweise begrenzten Zuverlässigkeit der Ausreißeridentifikation gering. Aus den zuvor beschriebenen Gründen wurde im Rahmen dieser Arbeit auf das Entfernen von Ausreißern aus Stichproben grundsätzlich verzichtet.

Kapitel 5

Versuche mit monoton steigender Beanspruchung

5.1 Einordnung

Bei normalfesten Betonen führen erhöhte Beanspruchungsgeschwindigkeiten zu einer erhöhten Druckfestigkeit, einem vergrößerten linearen Bereich der Spannungs-Dehnungslinie und zu einer höheren Steifigkeit (vgl. Abschnitt 2.1.3). Die Steifigkeit soll dabei weniger stark beeinflusst sein als die Druckfestigkeit. Für den Einfluss auf die Dehnung bei Maximallast und die Bruchdehnung sind in der Literatur jedoch widersprüchliche Ergebnisse dokumentiert. Die in der Literatur dokumentierten Untersuchungen an normalfesten Betonen zum Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit wurden hauptsächlich mit Weg- oder Verformungsregelung durchgeführt. Die Regelungsart beeinflusst dabei insbesondere die Bruchdehnungen, da nur bei Weg- bzw. Verformungsregelung ein abfallender Ast der Spannungs-Dehnungslinie erfassbar ist.

Hochfeste Betone zeigen unter Druckbeanspruchung ein anderes Materialverhalten als normalfeste Betone (vgl. Abschnitt 2.1.2). Hinsichtlich des Einflusses der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das Materialverhalten hochfester Betone gibt es bisher jedoch nur sehr wenige Untersuchungen (vgl. Abschnitt 2.1.3). Zudem sind in der Literatur widersprüchliche Angaben zum Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit bei hochfesten Betonen im Vergleich zu dem bei normalfesten Betonen zu finden [Reinhardt – 1987], [Kim / Kim – 1996] [Han – 1996]. Gleichzeitig gibt es auch Hinweise darauf, dass das Materialverhalten hochfester Betone bei verschiedenen Beanspruchungsgeschwindigkeiten von der konkreten Zusammensetzung der Betone abhängig sein könnte [Sparks / Menzies – 1973], [Zhang et al. – 2012].

In diesem Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse zum Materialverhalten des hochfesten Betons bei monoton steigender Beanspruchung vorgestellt. Das Materialverhalten wurde, abgestimmt auf die zyklischen Beanspruchungen, in kraftgeregelten Druckversuchen bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten untersucht. Ziel dieser Versuche war es, die Druckfestigkeitssteigerung sowie die Änderung der Spannungs-Dehnungslinie infolge erhöhter Belastungsgeschwindigkeiten zu ermitteln. Die festgestellte Druckfestigkeitssteigerung sollte darüber hinaus im Hinblick auf ausgewählte Regelwerke bewertet werden.

Die ermittelten Spannungs-Dehnungslinien sind insbesondere für die folgenden Vergleiche zwischen dem Dehnungsverhalten bei zyklischer und monoton steigender Beanspruchung erforderlich (Abschnitt 8.2). Die ermittelten Bruchdehnungen dienen im Weiteren auch der Überprüfung der „Schädigungshypothese“ nach [Pfanner – 2003] und des Envelope-Konzepts (Abschnitt 8.2). Die ermittelten Druckfestigkeiten werden zur Überprüfung des in der Literatur dokumentierten Ansatzes zur Approximation von bei unterschiedlichen Belastungsfrequenzen ermittelten Bruchlastwechselzahlen durch die Berücksichtigung der bei erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten ermittelten Druckfestigkeiten herangezogen (Abschnitt 8.4).

5.2 Überblick über die untersuchten Beanspruchungsgeschwindigkeiten

Die Druckversuche zur Überprüfung von Einflüssen der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das Materialverhalten des hochfesten Betons bei monoton steigender Beanspruchung wurden kraft geregelt bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten durchgeführt. Ergänzend werden im Folgenden vergleichend auch die Referenzversuche ($\dot{w} = 0,20 \text{ mm/min}$) betrachtet, die der Ermittlung der Druckfestigkeiten als Grundlage für die Ermüdungsversuche dienen. Für die folgenden Auswertungen der Druckfestigkeiten wird näherungsweise eine zugehörige Lastgeschwindigkeit von $\dot{k} \approx 1 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ berücksichtigt. Tabelle 5.1 enthält eine Zusammenstellung der untersuchten Beanspruchungsgeschwindigkeiten.

Für die weiteren Auswertungen sind neben den Lastgeschwindigkeiten \dot{k} (prüfseitig vorgegeben) in erster Linie die Spannungsgeschwindigkeiten $\dot{\sigma}$ interessant, die ebenfalls in Tabelle 5.1 enthalten sind. Zu beachten ist, dass die Dehngeschwindigkeit bei kraft geregelter Versuchsdurchführung über den Belastungsverlauf nicht konstant ist. In Tabelle 5.1 sind die Dehngeschwindigkeiten trotzdem ergänzend angegeben, um eine größenordnungsmäßige Einordnung der eigenen Versuche in den Kontext der Ergebnisse aus der Literatur zu ermöglichen. Die angegebenen Dehngeschwindigkeiten wurden unter Berücksichtigung eines E-Moduls von $E = 42000 \text{ N/mm}^2$ für einen C80/95 nach [DIN EN 1992-1-1 – 2011] berechnet. Um eine bessere Unterscheidung zu ermöglichen, sind die Geschwindigkeiten, die nicht unmittelbar zur Regelgröße der Maschinenregelung gehören, in Tabelle 5.1 kursiv gedruckt.

Die vorgegebenen Prüfgeschwindigkeiten wurden von der verwendeten Prüfmaschine sehr genau aufgebracht. So ergab die Auswertung der Messdaten, dass die maximalen Abweichungen weniger als 1 % bezogen auf die vorgegebene Geschwindigkeit betragen.

Chargen	Beanspruchungsgeschwindigkeiten			
	\dot{k} [kN·s ⁻¹]	\dot{w} [mm/min]	$\dot{\sigma}$ [N/mm ² ·s ⁻¹]	$\dot{\varepsilon}$ [s ⁻¹]
Alle Chargen	<i>ca. 1</i>	0,20	0,35	rd. 8,0 10 ⁻⁶
B19	4,453	-	1,57	rd. 3,7 10 ⁻⁵
B19, B21, B22, B23	44,53	-	15,7	rd. 3,7 10 ⁻⁴
B12 (Tastversuche)	91,96	-	32,5	rd. 7,4 10 ⁻⁴
B19, B21, B22, B23	445,3	-	157	rd. 3,7 10 ⁻³
B14 (Tastversuche)	664	-	235	rd. 5,3 10 ⁻³
B13 (Tastversuche)	669	-	237	rd. 5,4 10 ⁻³
B19	4453	-	1575	rd. 3,7 10 ⁻²
Kursiv geschriebene Werte gehören nicht zur Regelgröße				

Tabelle 5.1: Untersuchte Beanspruchungsgeschwindigkeiten

5.3 Beeinflussung der Spannungs-Dehnungslinie

Im Folgenden wird der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Materialverhalten des untersuchten hochfesten Betons betrachtet. Ausgewertet werden die experimentellen Untersuchungen an den Chargen B21, B22 und B23.

In Abbildung 5.1, Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3 sind jeweils die Mittelwertkurven der Spannungs-Dehnungslinien für die untersuchten Beanspruchungsgeschwindigkeiten dargestellt. Dabei wurden die Spannungen über definierte Dehnungswerte als Stützstellen mit einem Stützstellenabstand kleiner 0,05 % gemittelt. Die dargestellten Mittelwertkurven können jeweils nur bis zur kleinsten Bruchdehnung der zugrunde liegenden Einzelkurven berechnet werden. Für die detaillierte Betrachtung der Bruchdehnungen müssen die Spannungs-Dehnungslinien der einzelnen Proben herangezogen werden, die im Anhang A-2.1 dargestellt sind. Die Werte der Druckfestigkeit und der Bruchspannung sowie die zugehörigen Dehnungen sind in Anhang A-2.2, Tabelle A 2.1 enthalten.

Anhand von Abbildung 5.1, Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3 ist zu sehen, dass im Bereich niedriger Spannungen jeweils bei allen drei bzw. zwei Kurven kaum Unterschiede der Steifigkeiten zu sehen sind. Erst im Bereich höherer Beanspruchungen sind Unterschiede der Kurven feststellbar, wobei diese Beanspruchungsbereiche bei den verschiedenen Chargen unterschiedlich sind. Bei den Kurven der Charge B21 und B23 sind Unterschiede bereits ab einer Spannung von ca. 50 N/mm² bzw. 60 N/mm² sichtbar (Abbildung 5.1, Abbildung 5.3), während bei den Kurven der Charge B22 erst ab ca. 70 N/mm² Unterschiede erkennbar sind

(Abbildung 5.2). In diesen Bereichen führen höhere Beanspruchungsgeschwindigkeiten zu einer Erhöhung der Steifigkeit.

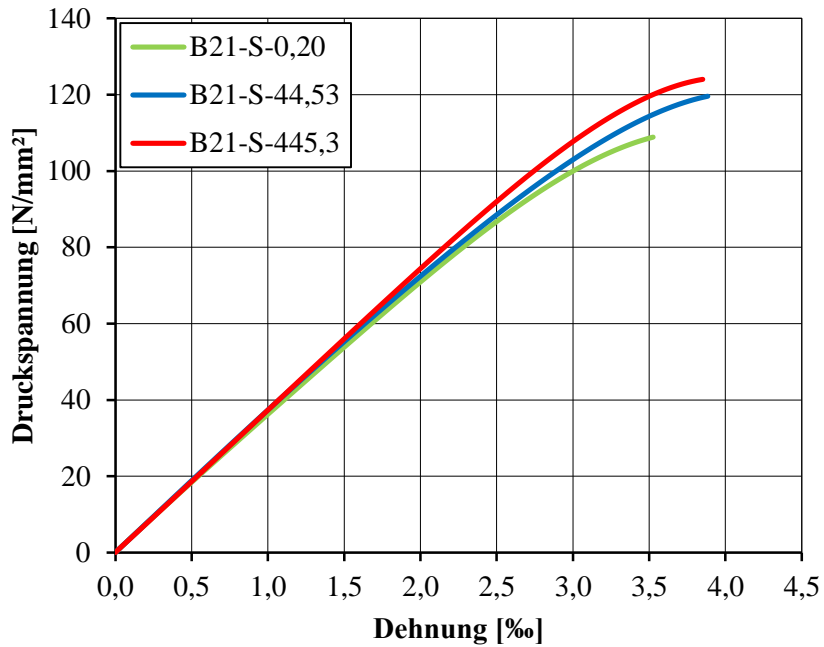


Abbildung 5.1: Mittelwertkurven der Spannungs-Dehnungslinien der Charge B21

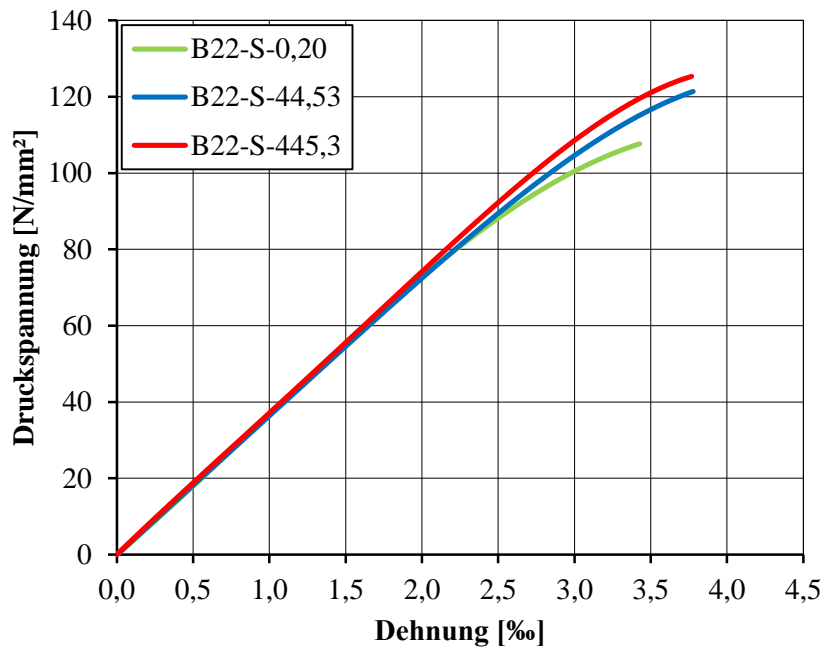


Abbildung 5.2: Mittelwertkurven der Spannungs-Dehnungslinien der Charge B22

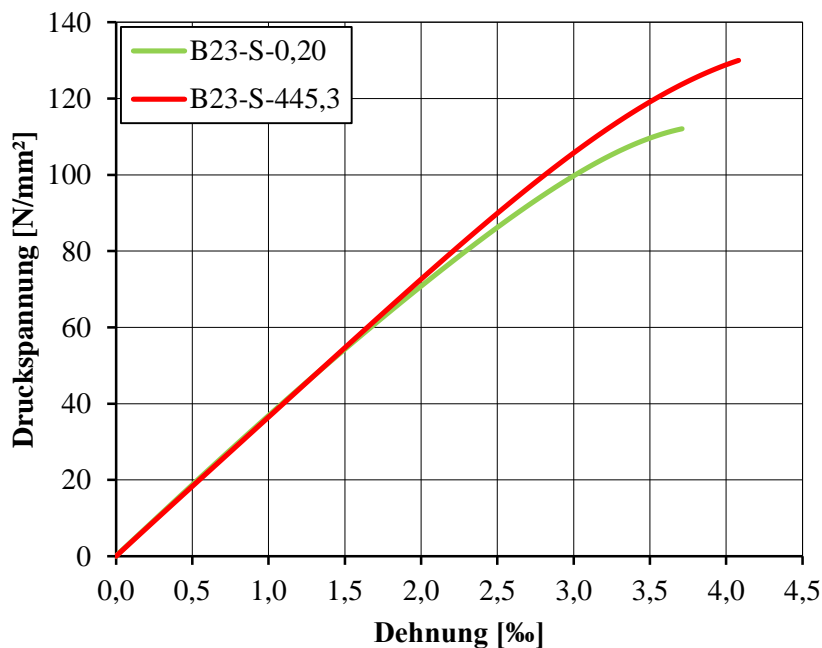


Abbildung 5.3: Mittelwertkurven der Spannungs-Dehnungslinien der Charge B23

Im weiteren Verlauf der Kurven schließen sich die nichtlinearen Bereiche an. Es ist deutlich zu sehen, dass der Bereich des linearen Materialverhaltens mit steigender Beanspruchungsgeschwindigkeit größer wird. Hieraus ergeben sich bei höherer Beanspruchungsgeschwindigkeit im Bereich hoher Beanspruchungen kleinere Dehnungen für gleich große Spannungen. Die Druckfestigkeit als Maximalwert der erreichten Spannung steigt mit steigender Belastungsgeschwindigkeit an.

Eine zahlenmäßige Betrachtung der Bruchdehnung ermöglicht Tabelle A 2.1 in Anhang A-2.2, in der die Werte der Bruchdehnungen als Einzel- und Mittelwerte zusammengestellt sind. Es ist zu sehen, dass die mittleren Bruchdehnungen und die mittleren Dehnungen bei Maximallast von den weggeregeltten Versuchen bei niedriger Geschwindigkeit hin zu den kraftgeregelten Versuchen bei höherer Belastungsgeschwindigkeit deutlich ansteigen. Werden nur die kraftgeregelten Versuche betrachtet, so zeigt sich ein nicht einheitliches Ergebnis. Während die Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit bei Charge B21 zu einer Verkleinerung der mittleren Bruchdehnungen sowie der mittleren Dehnungen bei Maximallast führt, ist bei Charge B22 eine leichte Vergrößerung der mittleren Dehnung bei Druckfestigkeit und kaum eine Änderung der mittleren Bruchdehnung zu sehen. Auch die in Tabelle A 2.2 und A 2.3 zusammengestellten Dehnungen bei Maximallast und Bruchdehnungen der Versuche der Charge B19 lassen keine einheitliche Beeinflussung durch die Belastungsgeschwindigkeiten erkennen.

Dieses ist auf die Streuungen der Druckfestigkeiten zwischen den einzelnen Proben zurückzuführen, die die Effekte aus erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten auf die Dehnung bei Maximallast und die Bruchdehnung überlagern. Aufgrund der Streuungen kann somit keine aus-

geprägte Beeinflussung der Bruchdehnung und der Dehnung bei Maximallast im Bereich der hier verwendeten Belastungsgeschwindigkeiten festgestellt werden.

Die in Anhang A-2.1 abgebildeten Kurven und die Zahlenwerte in Tabelle A 2.1 zeigen, dass sich bei weggeregelter Versuchsdurchführung für den hochfesten Beton allenfalls ein kleiner Ansatz eines abfallenden Astes der Spannungs-Dehnungslinien einstellt. Bei beiden Regulationsarten und bei sämtlichen Belastungsgeschwindigkeiten trat ein plötzliches, explosionsartiges Versagen der Proben ein. Die Bruchflächen verliefen dabei auch durch die Gesteinskörnung.

Die festgestellte Beeinflussung der Spannungs-Dehnungslinien im Bereich hoher Beanspruchungen lässt die Hypothese zu, dass auch die Dehnungen infolge Ermüdungsbeanspruchung, insbesondere bei hohen Beanspruchungen, durch die Belastungsgeschwindigkeit beeinflusst werden:

H6) „Geschwindigkeits-Dehnungs-Hypothese“: Die sich unter Ermüdungsbeanspruchung in jedem Lastwechsel einstellenden Dehnungen, und damit das Materialverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung, sind abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit.

Hinsichtlich des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Druckfestigkeit sowie hinsichtlich der Form der Spannungs-Dehnungslinie bestätigen die eigenen Untersuchungsergebnisse die in der Literatur dokumentierten, eindeutigen Feststellungen, dass die Druckfestigkeit bei erhöhter Belastungsgeschwindigkeit ansteigt und der Bereich des linearen Materialverhaltens größer wird. Es bestätigt sich auch, dass die Steifigkeit, insbesondere im Bereich hoher Beanspruchungen, infolge der Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit ansteigt. Wie auch in der Literatur dokumentiert ist, zeigen die eigenen Versuchsergebnisse einen nicht eindeutigen Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Bruchdehnung sowie auf die Dehnung bei Maximallast.

5.4 Charakteristik der Druckfestigkeitssteigerung

Anhand der gemittelten Spannungs-Dehnungslinien in Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.3 des vorherigen Abschnitts ist zu sehen, dass die Druckfestigkeit des hochfesten Betons mit steigender Beanspruchungsgeschwindigkeit zunimmt. Im Folgenden soll nun der Zusammenhang zwischen Belastungsgeschwindigkeit und Druckfestigkeitssteigerung genauer betrachtet werden. Hierzu werden zunächst die Ergebnisse der Untersuchungen an der Charge B19 betrachtet.

Ziel dieser Versuche war es, den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Festigkeit und Belastungsgeschwindigkeit für den hochfesten Beton zu untersuchen. Aufgrund der wenigen in der Literatur dokumentierten Forschungsergebnisse war zu überprüfen, ob der in der Litera-

tur dokumentierte lineare Zusammenhang zwischen Festigkeitssteigerung und logarithmierter Belastungsgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 2.1.3) auf den hochfesten Beton bei kraftgeregelter Versuchsdurchführung grundsätzlich übertragen werden kann. Hierzu wurde eine gegenüber den anderen Versuchsreihen erhöhte Probekörperanzahl geprüft. Zusätzlich wurden zwei weitere Belastungsgeschwindigkeiten verwendet (vgl. Abschnitt 4.4), wobei sich diese jeweils um den Faktor 10 voneinander unterschieden. Die Untersuchungen wurden an einer Probekörpercharge (B19) mit einem höheren Betonalter als bei den sonst verwendeten Proben von rund 515 Tagen durchgeführt. Aufgrund der Ausrichtung dieser Versuche auf die Untersuchung grundsätzlicher Zusammenhänge zwischen der Belastungsgeschwindigkeit und der Druckfestigkeitssteigerung erscheint die Verwendung dieser älteren Betoncharge als gerechtfertigt.

In Abbildung 5.4 sind die Einzel- und Mittelwerte der Druckfestigkeiten über die logarithmierten Belastungsgeschwindigkeiten aufgetragen. Es ist zu sehen, dass die Druckfestigkeit mit erhöhter Belastungsgeschwindigkeit ansteigt. Darüber hinaus ist zu sehen, dass sich die Mittelwerte der Druckfestigkeit im halb-logarithmischen Raum sehr gut durch eine Gerade approximieren lassen. Die Zahlenwerte der Druckfestigkeiten können Tabelle A 2.2 und A 2.3 im Anhang A-2.2 entnommen werden. Die Gleichung der Regressionsgerade ist in Anhang A-2.3 angegeben.

Es kann festgestellt werden, dass auch für den hier untersuchten hochfesten Beton im halb-logarithmischen Raum ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeitssteigerung und der Belastungsgeschwindigkeit besteht. Bei den weiteren Auswertungen der Versuche kann somit eine lineare Approximation der Festigkeitssteigerung zu Grunde gelegt werden. Der Einfluss des höheren Betonalters auf das Maß der Festigkeitssteigerung unter erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten ist aufgrund der eigenen Versuche nicht abschätzbar, aber auch nicht Gegenstand dieser Untersuchungen. Bereits die Druckfestigkeiten der Referenzversuche für die Chargen B19, B21, B22 und B23 sind deutlichen Streuungen unterworfen (vgl. Tabelle A 2.1, A 2.2). Dementsprechend ist es sinnvoll, eine chargenweise Approximation der Festigkeitssteigerung vorzunehmen.

In Abbildung 5.5 sind die für die verschiedenen Chargen ermittelten Regressionsgeraden zusammen mit den zugrunde liegenden Mittelwerten der Druckfestigkeiten dargestellt. Bei den Chargen B12 – B14 sowie B23 basieren die Regressionsgeraden jeweils auf zwei Werten, weshalb auf die Darstellung dieser Einzelwerte aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet wird. Die Gleichungen der Regressionsgeraden sind in Anhang A-2.3 angegeben. In Abbildung 5.5 ist zunächst zu sehen, dass die Referenzfestigkeiten bei $\log v = 0,0$ zwischen den verschiedenen Chargen deutlich streuen. Die etwas höhere Festigkeit der Charge B19 könnte mit dem fortgeschrittenen Betonalter dieser Charge erklärt werden. Aber auch zwischen den anderen Chargen gibt es deutliche Streuungen der Referenzfestigkeit. Darüber hinaus ist zu sehen, dass die Steigungen der Geraden für die verschiedenen Chargen teilweise deutliche

Unterschiede aufweisen. Das heißt, dass die Druckfestigkeitssteigerung infolge erhöhter Belastungsgeschwindigkeiten chargenweise unterschiedlich hoch ist. Es sollte daher je nach Art der weiteren Verwendung entschieden werden, ob eine Approximation des Zusammenhangs zwischen Druckfestigkeitssteigerung und der Belastungsgeschwindigkeit über die Chargen hinweg sinnvoll ist.

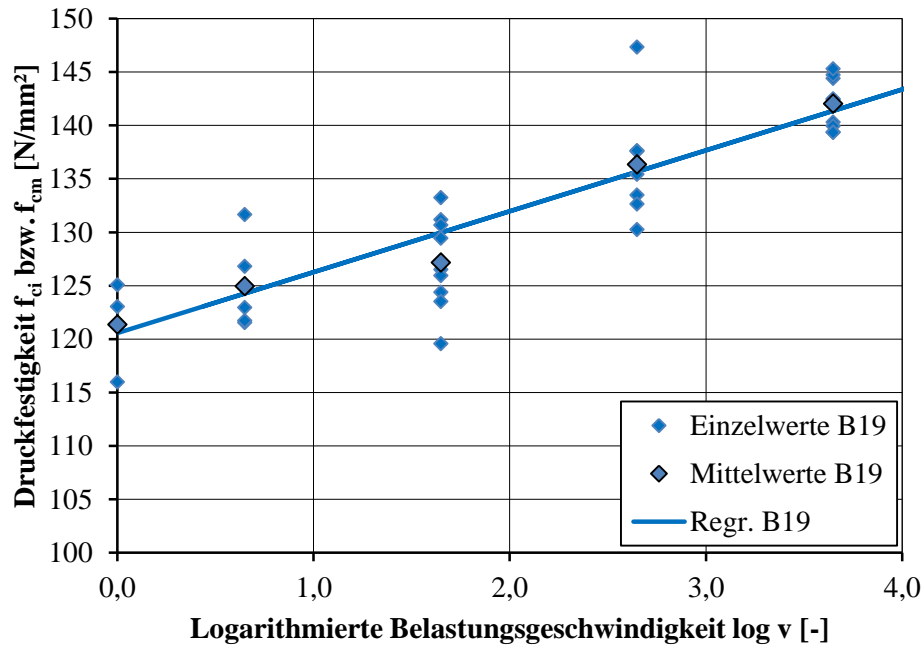


Abbildung 5.4: Druckfestigkeitssteigerung in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit (B19)

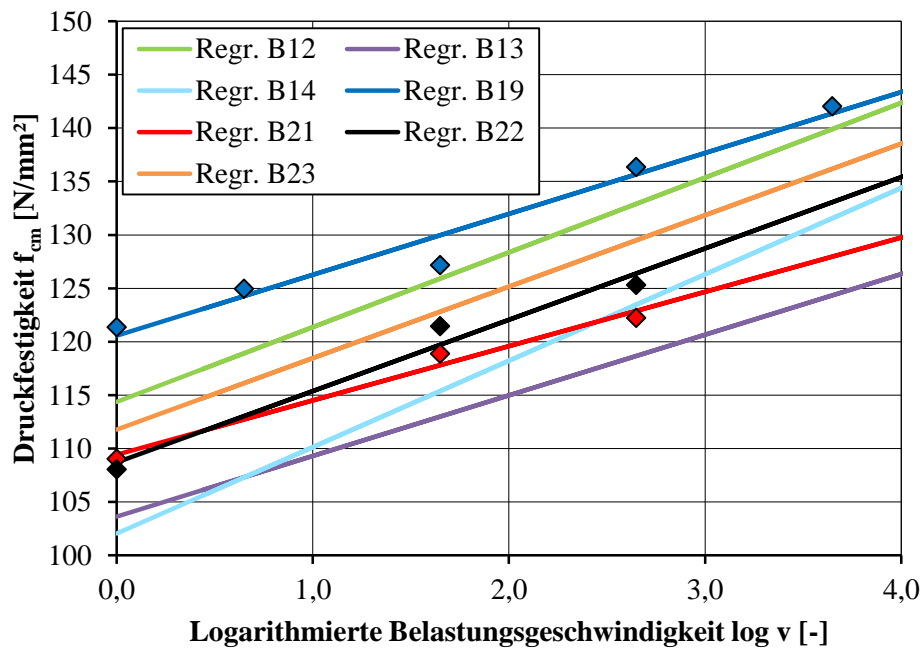


Abbildung 5.5: Druckfestigkeitssteigerung für verschiedene Chargen

5.5 Vergleich der Druckfestigkeitssteigerung mit Regelwerken

Die Approximationsansätze nach Model Code 90 [CEB/FIP – 1993] bzw. Model Code 2010 [fib – 2013] werden im Folgenden für den Vergleich mit den eigenen Versuchsergebnissen herangezogen. Beide enthalten Exponentialfunktionen mit sehr kleinen Krümmungen zur Beschreibung der Festigkeitssteigerung bei erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten (Abschnitt 2.1.3, Gleichung 2.2 bzw. 2.3).

Für den Vergleich wurde die in Model Code 90 angegebene Funktion unter Berücksichtigung des rechnerischen Mittelwerts der Druckfestigkeit von $f_{cm} = 88 \text{ N/mm}^2$ für einen Beton der Festigkeitsklasse C80/95 ausgewertet. Die Funktion nach Model Code 2010 ist unabhängig von der mittleren Druckfestigkeit.

In Abbildung 5.6 sind die ermittelten Kurven den mittleren Druckfestigkeitssteigerungen der Chargen gegenübergestellt. Auf der Ordinate sind die bezogenen Druckfestigkeiten und auf der Abszisse die Belastungsgeschwindigkeiten in logarithmierter Skalierung aufgetragen. Die Bezugsfestigkeiten der einzelnen Chargen bei der vorgegebenen Bezugsgeschwindigkeit von $\dot{\sigma}_{c0} = 1 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ mussten hierfür über lineare Regressionen berechnet werden.

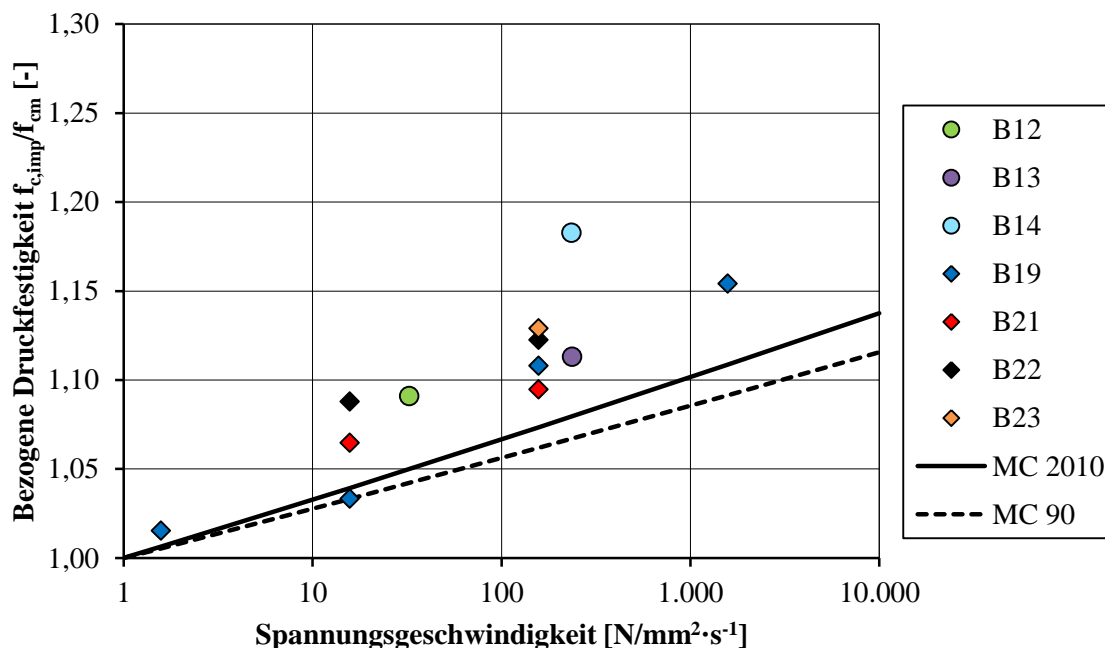


Abbildung 5.6: Vergleich der Druckfestigkeiten mit den Funktionen nach Model Code 90 und Model Code 2010

Abbildung 5.6 zeigt deutlich, dass der Approximationsansatz nach Model Code 2010 eine größere Festigkeitssteigerung beschreibt als der Ansatz nach Model Code 90. Gleichzeitig ist zu sehen, dass die für den hochfesten Beton ermittelten bezogenen Druckfestigkeiten, besonders im Bereich hoher Belastungsgeschwindigkeiten, auch von Model Code 2010 unterschätzt werden. Die Ansätze nach Model Code 2010 und Model Code 90 ergeben kleinere rechneri-

sche Druckfestigkeitssteigerungen, als sie für den hochfesten Beton experimentell ermittelt wurden.

5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurden experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Druckfestigkeit und auf den Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie in kraftgeregelten Versuchen an einem hochfesten Beton durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine erhöhte Belastungsgeschwindigkeit zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit und zu einer Vergrößerung des Bereichs linearen Materialverhaltens führt. Die Steifigkeit wird im Bereich hoher Beanspruchungen durch die erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten ebenfalls erhöht. Im Bereich hoher Beanspruchungen werden hierdurch bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten für gleiche Spannungen kleinere Dehnungen erreicht. Hinsichtlich der Bruchdehnung und der Dehnung bei Maximallast konnte kein eindeutiger Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit in den kraftgeregelten Versuchen festgestellt werden. Der Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeitssteigerung und der Belastungsgeschwindigkeit kann im halb-logarithmischen Raum durch eine Gerade oder durch eine Exponentialfunktion mit sehr kleiner Krümmung beschrieben werden. Die in Model Code 90 und Model Code 2010 angegebenen Ansätze unterschätzen die Festigkeitssteigerung des hier untersuchten hochfesten Betons, insbesondere im Bereich hoher Belastungsgeschwindigkeiten.

Die Untersuchung der Festigkeitssteigerung wurde im Rahmen dieser Arbeit im Hinblick auf die erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten unter Ermüdungsbeanspruchung durchgeführt. Mit Blick auf Ermüdungsbeanspruchungen lässt der festgestellte Einfluss auf die Spannungs-Dehnungslinie die Hypothese zu, dass auch das Materialverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung durch die Belastungsgeschwindigkeiten bei Be- und Entlastung beeinflusst sein könnte (Hypothese H6).

Die Spannungs-Dehnungslinien, die Bruchdehnungen und die Druckfestigkeiten werden in weitergehenden kombinierten Untersuchungen zum Materialverhalten des hochfesten Betons bei Ermüdungsbeanspruchung und monoton steigender Beanspruchung verwendet.

Kapitel 6

Ermüdungsversuche

6.1 Überblick

Der Widerstand von Beton gegenüber Ermüdungsbeanspruchungen wurde bisher hauptsächlich anhand der Bruchlastwechselzahlen untersucht (vgl. Abschnitt 2.2). Basierend auf diesem Stand der Forschung, wird der Ermüdungswiderstand von Beton im Allgemeinen anhand der Bruchlastwechselzahlen beurteilt und nachgewiesen (vgl. z. B. [CEB / FIP – 1993] bzw. [fib – 2013]). Die Bruchlastwechselzahlen stellen jedoch, ähnlich wie die Druckfestigkeit, nur einen Aspekt zur Beurteilung des Materialverhaltes unter Ermüdungsbeanspruchung dar. Weitere wesentliche Aspekte sind die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung unter Ermüdungsbeanspruchung, die jedoch deutlich seltener Gegenstand der Forschung waren (vgl. Abschnitt 2.2).

Ermüdungsbeanspruchungen unterscheiden sich von monoton steigenden Beanspruchungen und Dauerstandbeanspruchungen durch ihre komplexe Beanspruchungscharakteristik bestehend aus den vielen Wiederholungen von Be- und Entlastungen. Das Ermüdungsverhalten wird durch jeden einzelnen Lastzyklus beeinflusst. Die Ermüdungsfestigkeit bzw. die Bruchlastwechselzahl ist nur das Endergebnis dieses Prozesses. Der Widerstand von Beton gegen Ermüdung in diesem Prozess wird insofern eher durch das Dehnungs- und Steifigkeitsverhalten beschrieben. Eine realitätsnahe und verallgemeinerbare Beurteilung des Widerstands von Beton gegen Ermüdung sollte daher auf Grundlage fundierter Kenntnisse zum Dehnungs- und Steifigkeitsverhalten sowie zu den Einflüssen hierauf erfolgen. Derzeit fehlt hierzu jedoch die notwendige Datenbasis.

Im Folgenden werden die durchgeführten Ermüdungsversuche daher sowohl hinsichtlich der Bruchlastwechselzahlen als auch hinsichtlich der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen systematisch ausgewertet. Dabei liegt dieser Arbeit die Arbeitshypothese zugrunde, dass Einflüsse auf die Bruchlastwechselzahlen auch anhand der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen erkennbar sein müssen. Ziel der Ermüdungsversuche war es, dass Materialverhalten des hochfesten Betons unter Berücksichtigung der Einflüsse aus bezogener Oberspannung, Belastungsfrequenz und Wellenform systematisch zu untersuchen und zu beschreiben. Hierbei soll grundlegend ermittelt werden, inwieweit diese Einflüsse auch anhand der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen erkennbar sind. Das wenige diesbezüglich vorhandene Wissen soll substantiell erweitert werden.

Die Kenntnis der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung und ihrer Beeinflussung durch die Belastungsparameter ist die Grundlage für die Untersuchung möglicher Zusammenhänge des Dehnungsverhaltens bei Ermüdungsbeanspruchung und des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung.

6.2 Untersuchte Einflüsse und ihre Wechselwirkungen

Kontinuierliche zyklische Druckbelastungen werden durch drei primäre Parameter charakterisiert:

- Belastung bzw. Beanspruchung (Kraft oder Verformung bzw. Spannung oder Dehnung)
- Belastungsfrequenz d. h. Anzahl der Lastwechsel pro Zeiteinheit bzw. Dauer eines Lastwechsels
- Wellenform

Wird einer dieser drei Parameter verändert, so ergibt sich eine andere zyklische Belastung und eine Beeinflussung des Ermüdungsverhaltens ist zu erwarten. Im Rahmen der eigenen Untersuchungen wurden die Veränderung der Oberlast (bzw. Oberspannung) bei gleich bleibender Unterlast (bzw. Unterspannung), die Veränderung der Belastungsfrequenz und der Wechsel der Wellenform zwischen Sinus und Dreieck untersucht. Allgemein betrachtet, beeinflussen sich die oben genannten Belastungsparameter nicht gegenseitig. Wird jedoch ein Lastwechsel betrachtet, so wird die Größe der Belastungsgeschwindigkeit und/oder der Belastungsgeschwindigkeitsverlauf durch alle drei Belastungsparameter als sekundäre Auswirkung beeinflusst.

Wechsel der Wellenform

Durch einen Wechsel der Wellenform erfolgt eine Veränderung der Form des Belastungsgeschwindigkeitsverlaufs im Lastwechsel (Abbildung 6.1). Der Geschwindigkeitsverlauf ist bei dreiecksförmiger Wellenform abschnittsweise konstant. Beim Sinus werden die extremen Beanspruchungen bei sehr niedriger Geschwindigkeit durchlaufen. Dagegen wird die Mittelast bei der höchsten Geschwindigkeit durchfahren. Durch den Wechsel der Wellenform vom Sinus zum Dreieck ändern sich also auch die zeitlichen Anteile verschiedener Belastungshöhen.

Im Vergleich zwischen Sinus und Dreieck wirken die extremen Beanspruchungshöhen beim Sinus im Lastwechsel länger als beim Dreieck. Die Dauer eines Lastwechsels wird genauso wie die Anzahl Lastwechsel pro Zeiteinheit durch den Wechsel der Wellenform nicht beeinflusst.

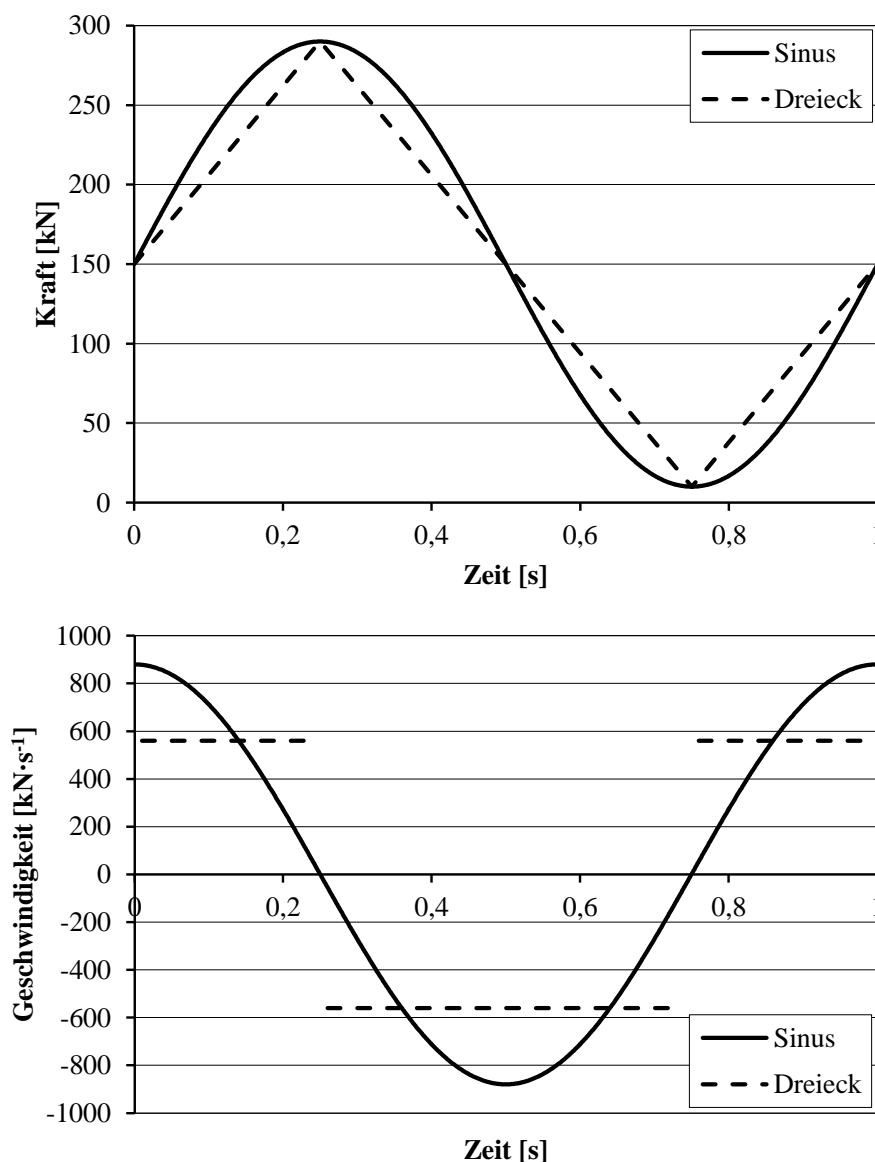


Abbildung 6.1: Auswirkung des Wechsels der Wellenform im Lastwechsel

Verkleinerung der Oberlast

Der Wechsel der Oberlast verändert als sekundäre Auswirkung die Höhe der Belastungsgeschwindigkeiten im Lastwechsel. Wird die Oberlast bei gleich bleibender Belastungsfrequenz und Unterlast verkleinert, so verkleinert sich die Höhe der Belastungsgeschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt des Lastwechsels, außer exakt zu den Zeitpunkten der Ober- und Unterlast (vgl. Abbildung 6.2). Gleichzeitig werden auch hierdurch die zeitlichen Anteile verschiedener Beanspruchungshöhen verändert. Bei einer Verkleinerung der Oberlast treten bestimmte hohe Oberlasten der ursprünglichen zyklischen Belastung nicht mehr auf. Belastungen oberhalb der Ausgangs-Mittellast wirken kürzer, Belastungen unterhalb der Ausgangs-Mittellast dafür länger als bei der zyklischen Ausgangsbelastung.

Die Dauer eines Lastwechsels wird genauso wie die Anzahl Lastwechsel pro Zeiteinheit nicht beeinflusst, wie in Abbildung 6.2 zu sehen ist.

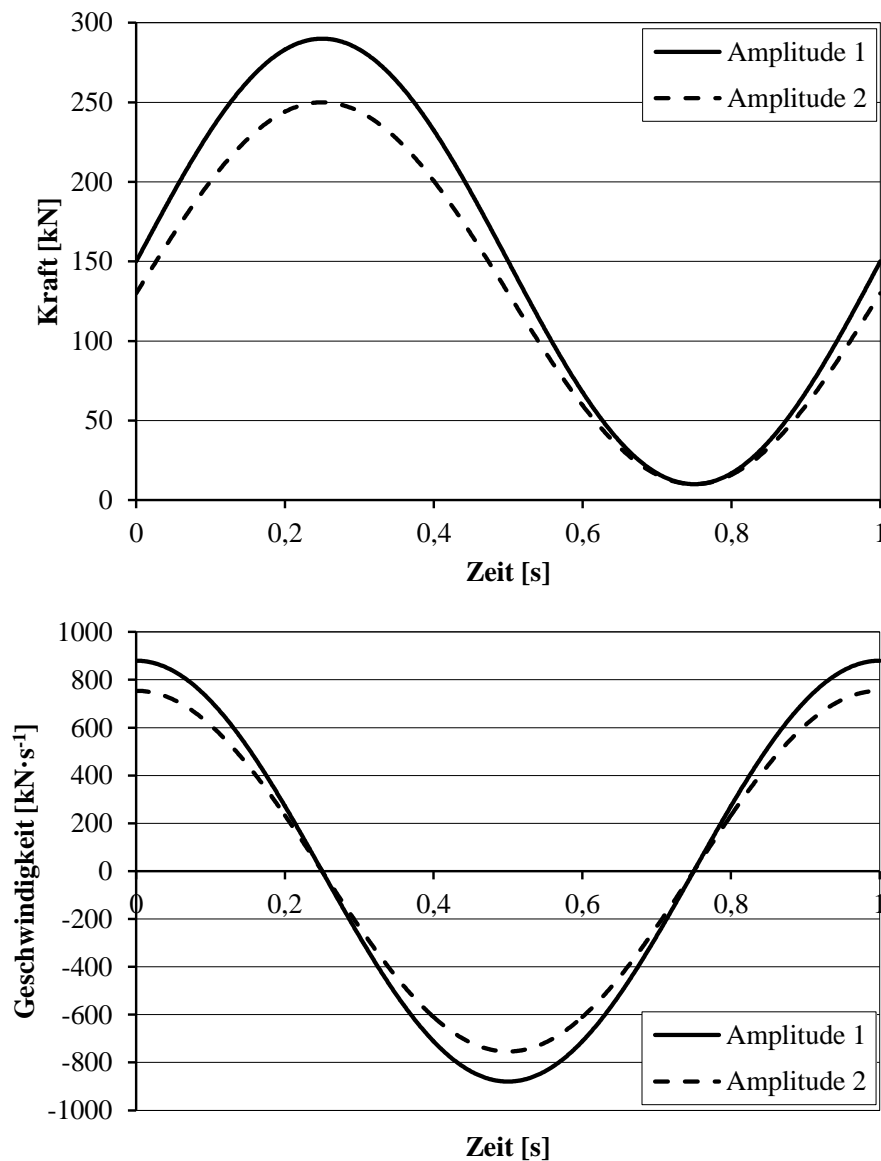


Abbildung 6.2: Auswirkung der Verkleinerung der Oberlast im Lastwechsel

Erhöhung der Belastungsfrequenz

Der Wechsel der Belastungsfrequenz entspricht einer Veränderung der Belastungsgeschwindigkeit im Lastwechsel. Wird die Belastungsfrequenz bei gleich bleibender Oberlast erhöht, so erhöht sich die Belastungsgeschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt des Lastwechsels, außer exakt zu den Zeitpunkten der Ober- und Unterlast (vgl. Abbildung 6.3). Gleichzeitig werden hierdurch die zeitlichen Anteile verschiedener Beanspruchungshöhen im Lastwechsel verkleinert, wobei das Verhältnis der Wirkungsauern von Beanspruchungen bestimmter Höhen zu einander konstant bleibt. Zusätzlich wird die Dauer eines Lastwechsels verändert und somit

auch die Anzahl Lastwechsel pro Zeiteinheit beeinflusst (Abbildung 6.3). Im Vergleich zu den anderen beiden untersuchten Einflüssen besteht diesbezüglich also ein deutlicher Unterschied der Auswirkungen. Aufgrund der Veränderung des Verhältnisses zwischen der zeitlichen Dauer und der Anzahl Lastwechsel des Ermüdungsprozesses sind bei Vergleichen der Dehnungs- bzw. Steifigkeitsentwicklungen von Versuchen verschiedener Frequenzen unterschiedliche Ergebnisse bei alternativer Verwendung der Zeit oder der Lastwechselzahl als Bezugshorizont zu erwarten.

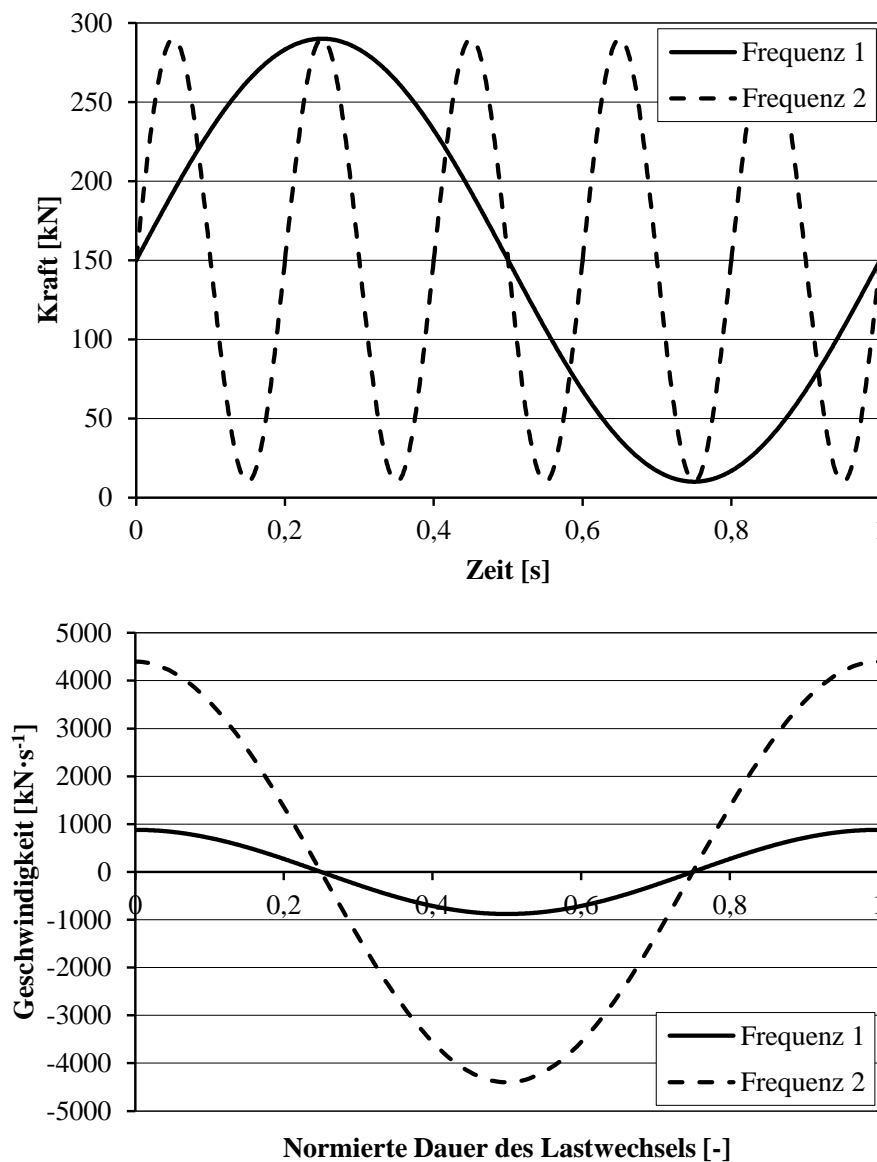


Abbildung 6.3: Auswirkung der Erhöhung der Belastungsfrequenz pro Zeiteinheit und im Lastwechsel

Übergeordnete Betrachtung

Werden die quantitativen Auswirkungen eines Frequenz- oder Oberlastwechsels betrachtet, so wird die Belastungsgeschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt innerhalb des Lastwechsels jeweils im gleichen Verhältnis verändert wie die Belastungsfrequenz bzw. wie die Amplitude. Bei sinusförmiger Wellenform und einem cosinusförmigen Geschwindigkeitsverlauf wirken sich die Änderung der Amplitude bzw. der Belastungsfrequenz somit besonders im Bereich hoher Geschwindigkeiten, und damit im Bereich des Durchfahrens der Mittellast, auf die Belastungsgeschwindigkeit aus. Im Bereich der Ober- und Unterlasten sind die Auswirkungen kleiner (Abbildung 6.2, Abbildung 6.3).

Die Geschwindigkeit bei dreiecksförmiger Belastung ist abschnittsweise im Lastwechsel konstant und wird daher bei Änderung der Amplitude oder Belastungsfrequenz über den Verlauf des Lastwechsels gleichmäßig beeinflusst. Der Wechsel der Wellenform vom Sinus zum Dreieck wirkt sich ebenfalls stark auf die Geschwindigkeit im Bereich des Durchfahrens der Mittellast aus. Im Bereich der Ober- und Unterlasten ist der Unterschied im Gegensatz zu den anderen beiden Einflüssen umso ausgeprägter, je weiter sich der Kraftverlauf der Ober- bzw. Unterlast nähert.

Die bezogene Oberspannung wird bei Ermüdungsuntersuchungen im Allgemeinen in Schritten von 5 % oder 10 % verändert. Dieses entspricht Änderungen der Amplitude um Faktoren kleiner als 1. Dagegen werden häufig Belastungsfrequenzen um den Faktor 10 verändert. Die Auswirkungen von Amplitudenänderungen dieser Größenordnung auf die Belastungsgeschwindigkeiten im Lastwechsel sind somit deutlich kleiner als die Auswirkungen von Frequenzänderungen dieser Größenordnung.

Die vorherigen Ausführungen verdeutlichen, dass die Veränderung jedes zyklischen Belastungsparameters immer auch eine Veränderung des Geschwindigkeitsverlaufs und damit eine Veränderung der Wirkungsdauer der durchlaufenen Beanspruchungen im Lastwechsel bedeutet. Eine scharfe Trennung der Effekte aus Belastungsgeschwindigkeit und Wirkungsdauer von unterschiedlich hohen Beanspruchungen ist bei üblichen zyklischen Versuchen mit kontinuierlich aufeinander folgenden Lastwechseln nicht möglich. Im Hinblick auf die „Doppeleffekt-Hypothese“ nach [Awad / Hilsdorf – 1971] soll bei den folgenden Auswertungen der Ermüdungsversuche jedoch untersucht werden, inwiefern Hinweise auf zeitliche Effekte und zyklische Effekte abgeleitet werden können. Zeitliche Effekte stehen dabei mit der Wirkungsdauer bei einer Beanspruchung bestimmter Höhe im Zusammenhang. Zyklische Effekte werden durch die Be- und Entlastungsvorgänge hervorgerufen. Beide Effekte sind von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig.

6.3 Genauigkeit der Prüfmaschinenregelung

Bei dem überwiegenden Teil der zyklischen Versuche war es erforderlich, die Amplitude bereits im ersten Lastwechsel in voller Höhe aufzubringen. Diese Art der Kraftaufbringung stellt für die Regelung der Prüfmaschine eine besonders hohe Anforderung dar. Insbesondere in den ersten Lastwechseln sind somit regelungstechnisch bedingte Abweichungen zwischen dem Soll-Wert und dem Ist-Wert der Kraft in den Peaks zu erwarten.

Gleichzeitig sind auch während des gesamten Versuchs Abweichungen zwischen dem Soll-Wert und dem Ist-Wert der Peaks nicht zu vermeiden. Diese Abweichungen wurden anhand der Versuche aus Versuchsblock E4 genauer analysiert und anschließend im Hinblick auf die weitere Auswertung der Versuchsergebnisse bewertet.

Die Analyse zeigte, dass Dreiecksversuche gegenüber den Sinusversuchen größere Streubreiten des Kraftsignals aufweisen. Darüber hinaus nehmen die Streubreiten der Kraft-Peaks mit steigender Frequenz zu. Bei verschiedenen bezogenen Oberspannungen und ansonsten gleichen Beanspruchungsparametern sind die Streubreiten dagegen annähernd gleich. Interessant ist, dass bei dreiecksförmiger Wellenform in den ersten Lastwechseln eine Tendenz zum Unterschwingen und bei sinusförmiger Wellenform eine Tendenz zum Überschwingen besteht. Es bleibt festzustellen, dass der Einfluss jeglicher bereichsweiser Abweichungen vom Soll-Wert der Kraft mit zunehmender Bruchlastwechselzahl kleiner wird, da der Anteil der beeinflussten Anzahl Lastwechsel gegenüber der Bruchlastwechselzahl dann ebenfalls zunehmend kleiner wird.

Der größte ermittelte Wert der Abweichung vom Soll-Signal beträgt $\Delta F_U = 3,4 \text{ kN}$ und ist beim Aufbringen der Unterlast aufgetreten. Für das Aufbringen der Oberlast wurde eine maximale Abweichung von $\Delta F_O = 2,0 \text{ kN}$ ermittelt. Beide Werte sind kleiner als der Streubereich der Druckfestigkeiten des hochfesten Betons (vgl. Anhang A-1.2). Gemittelt über die Versuche und die Versuchsdauern ergeben sich jeweils Werte kleiner als $0,5 \text{ kN}$ und damit sehr kleine Abweichungen. Aufgrund der sehr kleinen Größenordnung der Abweichungen ist davon auszugehen, dass diese die experimentell ermittelten Bruchlastwechselzahlen kaum beeinflussen. Hinsichtlich der Dehnungsentwicklungen können sich hieraus jedoch in den ersten Lastwechseln gegenüber einer exakten Lastaufbringung Abweichungen der Dehnungen ergeben. Gegenüber der Auswirkung eines Aufspanns der Amplitude über eine bestimmte Anzahl Lastwechsel ist die Auswirkung dieser regelungsbedingten Abweichungen gering.

Die Abweichungen des Soll- und Ist-Wertes der Kraft sind abhängig von den im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchenden Einflussparametern auf das Ermüdungsverhalten. Da die Genauigkeit der Lastaufbringung untrennbar mit der untersuchten Fragestellung verbunden ist und die Abweichungen gering sind, werden die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen der Versuche mit vollständiger Lastaufbringung trotzdem ab dem ersten Lastwechsel ausgewertet.

6.4 Bruchlastwechselzahlen

6.4.1 Einordnung

In der Literatur sind bereits einige Untersuchungen zu den Einflüssen der bezogenen Oberspannung und der Belastungsfrequenz auf die Bruchlastwechselzahlen dokumentiert (vgl. Abschnitt 2.2). Die Untersuchung des Einflusses der bezogenen Oberspannungen ist bei den meisten Ermüdungsuntersuchungen obligatorisch und entspricht dem Prinzip des Wöhlerdiagramms. Zum Einfluss der Belastungsfrequenz ist in der Literatur dokumentiert, dass im Bereich hoher bezogener Oberspannungen niedrigere Belastungsfrequenzen zu kleineren Bruchlastwechselzahlen führen (Abschnitt 2.2.5). Für den Wechsel der Wellenform vom Sinus zum Dreieck wurden in den wenigen Untersuchungen an normalfesten Betonen höhere Bruchlastwechselzahlen festgestellt (Abschnitt 2.2.6).

Insgesamt betrachtet zeigt die Literaturlauswertung, dass zu hochfesten Betonen deutlich weniger Untersuchungen dokumentiert sind als zu normalfesten Betonen. Hinzu kommt, dass der Frequenzeinfluss in den Regelwerken bei der Ermüdungsbemessung in den zugrunde gelegten Wöhlerkurven nicht berücksichtigt wird (Abschnitt 2.2.2). Eine Erhöhung der Datenbasis zur Ermüdungsfestigkeit von hochfesten Betonen ist somit insgesamt als auch im Hinblick auf den Einfluss verschiedener Belastungsfrequenzen sinnvoll, um diese zukünftig besser in den Regelwerken berücksichtigen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden insgesamt 179 zyklische Versuche an einem hochfesten Beton bei bezogenen Oberspannungen von $S_O = 0,95 - 0,60$, Belastungsfrequenzen von $f_p = 0,1 - 10,0$ Hz und zwei Wellenformen (Sinus und Dreieck) durchgeführt. Die bezogene Unterspannung wurde mit $S_U = 0,05$ bei allen Versuchen konstant gehalten.

Anhand dieser experimentellen Untersuchungen wird im Folgenden der Einfluss der bezogenen Oberspannung, der Belastungsfrequenz und der Wellenform auf die Bruchlastwechselzahlen untersucht. Darüber hinaus werden die ermittelten Bruchlastwechselzahlen im Hinblick auf in der Literatur dokumentierte Ergebnisse und im Hinblick auf die in Regelwerken vorgegebenen Wöhlerkurven beurteilt. Die Bruchlastwechselzahlen sind die Basis für die Auswertungen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen (Abschnitt 6.5). Sie werden zusätzlich für die Beurteilung des Ansatzes zur Approximation von bei unterschiedlichen Belastungsfrequenzen ermittelten Bruchlastwechselzahlen durch die Berücksichtigung der bei erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten ermittelten Druckfestigkeiten benötigt (Abschnitt 8.4).

6.4.2 Einfluss der bezogenen Oberspannung

Im Allgemeinen wird die Ermüdungsfestigkeit von Betonen untersucht, indem die bezogene Oberspannung und/oder die bezogene Unterspannung variiert werden. Dementsprechend diente die Untersuchung der Bruchlastwechselzahlen für verschiedene bezogene Oberspan-

nungen dazu, den untersuchten hochfesten Beton anhand der Ermüdungsfestigkeit in den Kontext anderer, in der Literatur dokumentierter Betone einzuordnen. Hierzu werden zunächst die Bruchlastwechselzahlen der Sinusversuche einer Frequenz von $f_p = 10,0$ Hz ausgewertet (Versuchsblock E1). Bei diesen Untersuchungen betragen die bezogenen Oberspannungen $S_O = 0,80 - 0,60$.

Im Vorfeld dieser Auswertung ist zu prüfen, ob die Versuche mit und ohne Aufspannen der Amplitude gemeinsam ausgewertet werden können (vgl. Abschnitt 4.4.2). Hierfür wurden die logarithmierten Bruchlastwechselzahlen der Versuche der Charge B13 mit $f_p = 10,0$ Hz auf Varianz- und Mittelwerthomogenität geprüft. Die durchgeführte Prüfung auf Varianzhomogenität und Mittelwerthomogenität hat keine signifikanten Unterschiede ergeben (vgl. Anhang A-3.1.2, Tabelle A 3.9). Darüber hinaus liegen für das Beanspruchungsniveau $S_O = 0,80$ und $f_p = 10,0$ Hz Prüfergebnisse aus zwei verschiedenen Chargen (B2, B13) vor. Auch hier konnten keine signifikanten Unterschiede der Mittelwerte der Bruchlastwechselzahlen festgestellt werden (vgl. Anhang A-3.1.2, Tabelle A 3.10). Dementsprechend werden die Bruchlastwechselzahlen dieser Untersuchungen im Folgenden zusammengefasst betrachtet.

In Abbildung 6.4 sind die Mittelwerte der Versuche bei $f_p = 10,0$ Hz (HPC C80/95) zusammen mit in der Literatur dokumentierten Ergebnissen sowie Modellansätzen dargestellt. Die Versuchsergebnisse des hochfesten Betons sind jeweils durch Geraden miteinander verbunden. Bruchlastwechselzahlen von Versuchen, bei denen kein Versagen der Proben eintrat, sind durch Pfeile als „Durchläufer“ markiert.

Es ist zu erkennen, dass die Bruchlastwechselzahlen für kleinere bezogene Oberspannungen ansteigen. Dieses Ergebnis war zu erwarten und entspricht den Ergebnissen für normalfeste und hochfeste Betone anderer Wissenschaftler, z. B. [Holmen – 1979]. Darüber hinaus zeigt sich bei den Versuchen mit $f_p = 10,0$ Hz für bezogene Oberspannungen $S_O < 0,70$ ein Abflachen des Verlaufs der Wöhlerkurve, welches unter Berücksichtigung des Auftretens von „Durchläufern“ tatsächlich noch stärker ausgeprägt ist, als dargestellt werden kann.

Zum Vergleich sind die Versuchsergebnisse von [Hohberg – 2004], [Wefer – 2010], [Anders / Lohaus – 2007], die ebenfalls bei einer Prüffrequenz von $f_p = 10,0$ Hz ermittelt wurden, sowie Modellansätze von [Klausen – 1978] und [Hsu – 1981] in Abbildung 6.4 enthalten.

[Hohberg – 2004] führte Ermüdungsversuche an zylindrischen Proben mit $d/h = 100/300$ mm eines Betons B25, B45 und B95 bei einer Frequenz von $f_p = 10,0$ Hz durch.

In [Anders / Lohaus – 2007] sind zyklische Versuche an Proben mit $d/h = 70/210$ mm eines hochfesten Vergussmörtels (C150) dokumentiert. [Wefer – 2010] untersuchte einen normalfesten Beton mit $f_{c,cube100} = 60$ N/mm² (C40/50) und zwei ultra-hochfeste Betone mit $f_{c,cube100} = 160$ N/mm² bzw. $f_{c,cube100} = 180$ N/mm² an zylindrischen Proben mit $d/h = 60/180$ mm. Die beiden von [Wefer – 2010] untersuchten UHPC werden zusammengefasst betrachtet. Zu beachten ist, dass der UHPC 2,5 Vol.-% Stahlfasern enthielt und größtenteils einer Wärmebehandlung (WB) unterzogen wurde.

Bei den in Abbildung 6.4 ausgewerteten Vergleichsversuchen lagen die bezogenen Unterspannungen im Bereich von $S_U = 0,05$ und entsprachen somit dem festgelegten Unterspannungsniveau der eigenen Untersuchungen. Lediglich bei den Versuchen von [Hohberg – 2004] war die Unterspannung mit 2 N/mm^2 konstant festgelegt, sodass die bezogenen Unterspannungen mit $S_U \approx 0,06$ für den B25, $S_U \approx 0,04$ für den B45 bzw. $S_U \approx 0,02$ für den B95 geringfügig unterschiedlich waren. Die in Abbildung 6.4 enthaltenen Modellansätze nach [Klausen – 1978] und [Hsu – 1981] wurden für normalfeste Betone entwickelt.

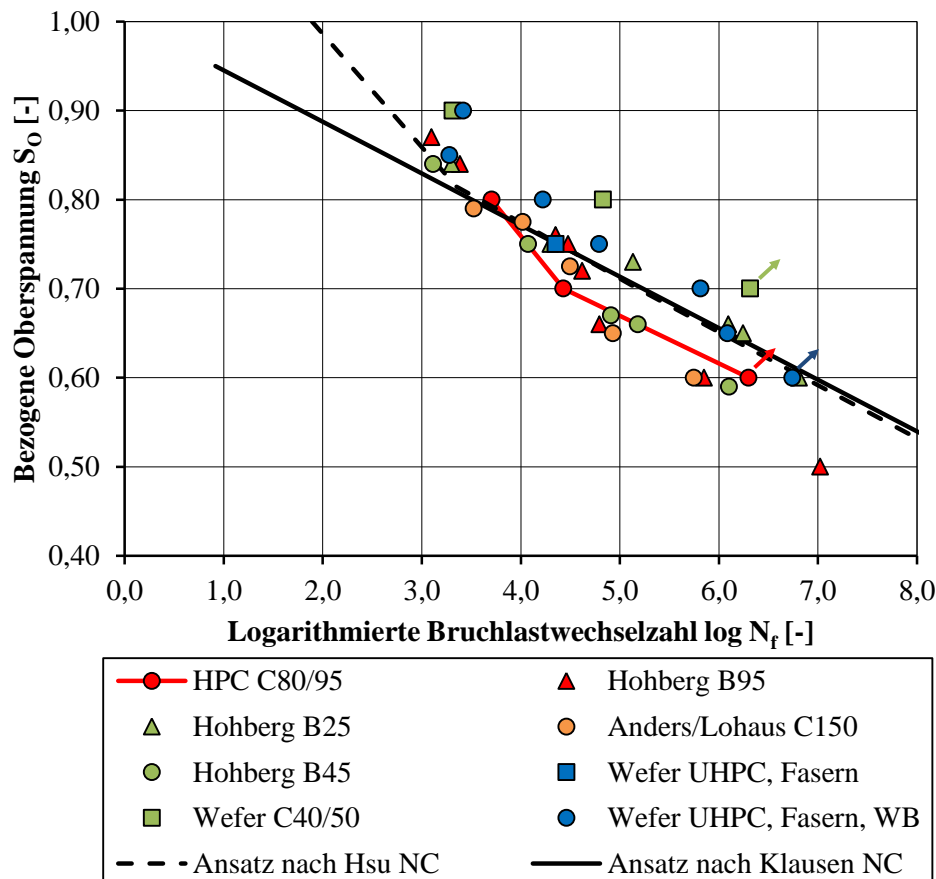


Abbildung 6.4: Vergleich der logarithmierten Bruchlastwechselzahlen mit der Literatur (Mittelwerte)

In Abbildung 6.4 ist zu sehen, dass der hier untersuchte hochfeste Beton ähnliche Bruchlastwechselzahlen zeigt wie sie in [Anders / Lohaus – 2007] für einen höherfesten Vergussmörtel und in [Hohberg – 2004] für einen B95 angegeben sind. Auch die Bruchlastwechselzahlen des B45 von [Hohberg – 2004] stimmen gut mit dem hier untersuchten hochfesten Beton überein. Der von [Hohberg – 2004] untersuchte B25 zeigt bei niedrigen Beanspruchungsniveaus dagegen höhere Bruchlastwechselzahlen als die hochfesten Betone. Auch der von [Wefer – 2010] untersuchte normalfeste Beton zeigt deutlich höhere Bruchlastwechselzahlen für alle Beanspruchungsniveaus als die hochfesten Betone. Die Ergebnisse der hochfesten Betone liegen für bezogene Oberspannungen $S_0 > 0,70$ im Bereich der für normalfeste Betone entwickelten Ansätze von [Hsu – 1981] und [Klausen – 1978], für $S_0 < 0,70$ erreichen sie jedoch niedrigere

Bruchlastwechselzahlen. Der UHPC erreicht etwas höhere Bruchlastwechselzahlen als die hochfesten Betone, was möglicherweise auch auf die Wärmebehandlung zurückgeführt werden kann [Wefer – 2010].

Der Vergleich mit den Bruchlastwechselzahlen und Modellansätzen aus der Literatur zeigt, dass sich die für den untersuchten hochfesten Beton ermittelten Bruchlastwechselzahlen plausibel einordnen lassen. Abbildung 6.4 zeigt darüber hinaus insgesamt, dass die Ermüdungsfestigkeitskurven für hochfeste Betone nicht zwangsläufig schlechter als für normalfeste Betone sein müssen. Die Relation der Ermüdungsfestigkeitskurven könnte auch von der konkreten Zusammensetzung der Betone abhängig sein, wie von [Sparks / Menzies – 1973], [Zhang et al. – 2012] in Zusammenhang mit dem Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Materialverhalten hochfester Betone vermutet wird. Gleichzeitig sind jedoch auch prüfbedingte Einflüsse nicht auszuschließen.

Der Einfluss der Oberspannung bei dreiecksförmiger Belastung wurde für die bezogenen Oberspannungen $S_O = 0,90$ und $S_O = 0,80$ (Charge B23) untersucht. Im Anhang A-3.1.2, Tabelle A 3.8 ist zu sehen, dass sich auch bei dieser Wellenform bei Verkleinerung des Beanspruchungsniveaus eine Vergrößerung der Bruchlastwechselzahlen ergibt.

Die statistische Analyse der verschiedenen Versuchsserien – auch derer bei niedrigeren Belastungsfrequenzen als $f_p = 10,0$ Hz (vgl. Abschnitt 6.4.3) – ergibt signifikante Änderungen der Mittelwerte der logarithmierten Bruchlastwechselzahlen infolge des Wechsels der bezogenen Oberspannung (vgl. Anhang A-3.1.2, Tabelle A 3.11). Im Vergleich zu den anderen untersuchten Einflüssen zeigt der Signifikanztest auf Mittelwerthomogenität beim Wechsel der Oberspannung am häufigsten Hinweise auf signifikante Unterschiede. Hieraus kann abgeleitet werden, dass der Einfluss der bezogenen Oberspannung auf die Bruchlastwechselzahlen im Vergleich zu den anderen untersuchten Einflüssen am stärksten ausgeprägt ist.

6.4.3 Einfluss der Belastungsfrequenz

Versuche mit sinusförmiger Belastung

Die Auswertung verschiedener Literaturstellen zum Frequenzeinfluss auf die Bruchlastwechselzahlen unter Druckschwellbeanspruchung hat ergeben, dass für normalfeste Betone, hohe bezogene Oberspannungen von $S_O > 0,75$ und Frequenzen bis ca. $f_p = 10,0$ Hz ein Frequenzeinfluss dahingehend besteht, dass niedrige Frequenzen zu kleineren Bruchlastwechselzahlen führen (Abschnitt 2.2.5). Für hochfeste Betone gibt es hierzu jedoch wenige dokumentierte Ergebnisse. Um den Frequenzeinfluss für den hochfesten Beton zu untersuchen, wurden Serienversuche bei hohen bezogenen Oberspannungen von $S_O = 0,95$, $0,90$, $0,80$ und $0,70$ und Prüffrequenzen von $f_p = 0,1$ Hz, $f_p = 1,0$ Hz, $f_p = 5,0$ Hz und $f_p = 10,0$ Hz im Rahmen der Versuchsblöcke E2, E3 und E4 durchgeführt.

Wie bereits in Abschnitt 4.4.2 beschrieben, wurden verschiedene Betonchargen des hochfesten Betons zur Untersuchung des Frequenzeinflusses verwendet. Daher fanden zusätzlich Vergleichsversuche bei $S_O = 0,80$ und $f_P = 1,0$ Hz statt, die der qualitativen Beurteilung des Chargeneinflusses auf die Untersuchungsergebnisse dienen (vgl. Tabelle 4.2). Auch die zyklische Beanspruchung $S_O = 0,80$ und $f_P = 0,1$ Hz wurde in zwei Versuchsserien getestet. Die statistische Analyse der ermittelten Bruchlastwechselzahlen zeigt, dass zwischen einzelnen Chargen signifikante Unterschiede bestehen könnten, wobei sich die Ergebnisse der Signifikanztests zum Teil widersprechen (vgl. Anhang A-3.1.2, Tabelle A 3.10).

In den betrachteten Versuchsserien wurden Proben verschiedener Chargen, aber der gleichen Betonmischung experimentell untersucht. Die „Wiederholbedingungen“ nach [DIN ISO 5725-1 – 1997] waren gegeben. Das heißt, die Probenvorbereitung, die Prüfmaschine, die Versuchsdurchführung, die Messtechnik, die Erfassung der Bruchlastwechselzahlen, die Umgebung und die Maschinenbedienerin, waren bei den Versuchen gleich. Insgesamt können die Hinweise auf signifikante Unterschiede daher nur auf die natürlichen Streuungen der Eigenschaften des geprüften Materials zurückgeführt werden. Die anhand verschiedener Chargen, aber gleichen zyklischen Beanspruchungen ermittelten Bruchlastwechselzahlen werden daher im Folgenden trotzdem gemeinsam betrachtet.

In Abbildung 6.5 sind die für verschiedene Frequenzen ermittelten logarithmierten Bruchlastwechselzahlen $\log N_F$ für sinusförmige Beanspruchungen und Prüffrequenzen von $f_P = 0,1$ Hz, $f_P = 1,0$ Hz, $f_P = 5,0$ Hz und $f_P = 10,0$ Hz als Einzel- und Mittelwerte dargestellt. Die Mittelwerte der Bruchlastwechselzahlen sind durch Geraden miteinander verbunden. Es ist insgesamt deutlich zu erkennen, dass für höhere Prüffrequenzen im Mittel höhere Bruchlastwechselzahlen erreicht werden. Lediglich die Versuchsergebnisse der Versuchsserie bei $f_P = 5,0$ Hz bestätigen den zuvor beschriebenen Zusammenhang nicht für jede bezogene Oberspannung. Diese Versuche zeigen im Vergleich zu den anderen Versuchen jedoch auch größere Streuungen der Bruchlastwechselzahlen, was auch anhand der größeren Standardabweichungen zu erkennen ist (vgl. Anhang A-3.1.2, Tabelle A 3.8).

Die statistische Analyse der Bruchlastwechselzahlen der Versuchsserien mit um Faktor 10 unterschiedlichen Belastungsfrequenzen zeigt, dass die Mittelwerte der einzelnen Versuchsserien in den meisten Fällen signifikant unterschiedlich sind (vgl. Anhang A-3.1.2, Tabelle A 3.12).

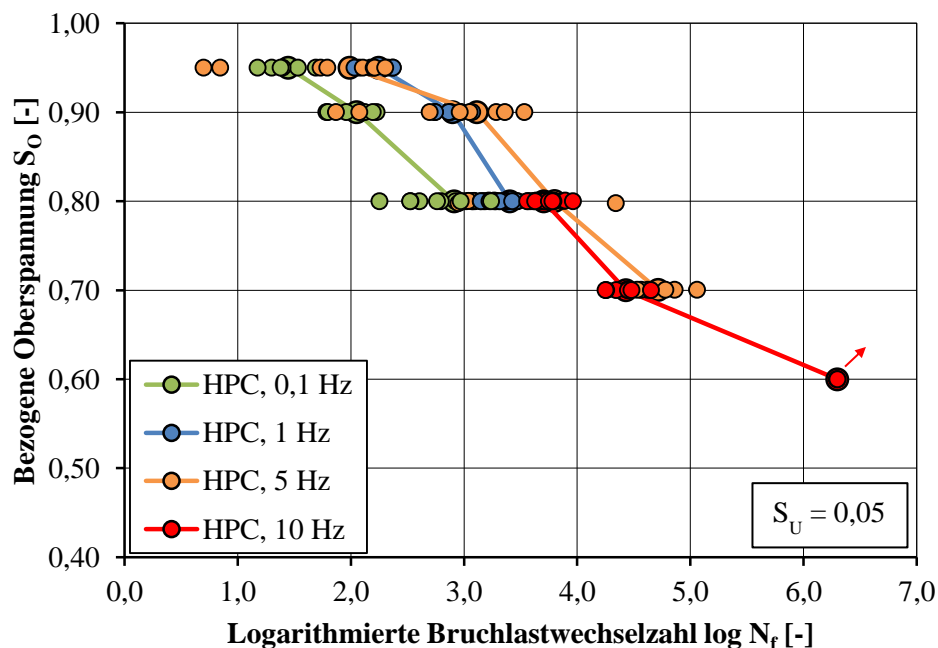


Abbildung 6.5: Einfluss der Belastungsfrequenz auf die logarithmierten Bruchlastwechselzahlen (Einzel- und Mittelwerte)

Für den Zusammenhang zwischen der bezogenen Oberspannung und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl können folgende Regressionsgeraden für die Prüffrequenzen $f_p = 0,1$ Hz, $f_p = 1,0$ Hz und $f_p = 10,0$ Hz angegeben werden.

$$f_p = 0,1 \text{ Hz: } \log N_f = -9,200 \cdot S_0 + 10,210 \quad r^2 = 0,863 \quad n = 25 \quad (6.1)$$

$$f_p = 1,0 \text{ Hz: } \log N_f = -6,799 \cdot S_0 + 8,809 \quad r^2 = 0,837 \quad n = 37 \quad (6.2)$$

$$f_p = 10,0 \text{ Hz: } \log N_f = -7,344 \cdot S_0 + 9,548 \quad r^2 = 0,777 \quad n = 24 \quad (6.3)$$

Dabei wurden die Lastwechselzahlen der Durchläufer der Versuche bei $f_p = 10,0$ Hz nicht berücksichtigt. Für die Bruchlastwechselzahlen bei $f_p = 5,0$ Hz wird aufgrund der größeren Streuungen keine Regressionsgerade angegeben. Die Regressionen sind zusammen mit den Einzelwerten der logarithmierten Bruchlastwechselzahlen in Abbildung 6.6 dargestellt.

In Abbildung 6.7 sind die Mittelwerte der logarithmierten Bruchlastwechselzahlen in Abhängigkeit von der Prüffrequenz für verschiedene Oberspannungsniveaus dargestellt. Es ist zu sehen, dass der Anstieg der Bruchlastwechselzahlen bei allen Oberspannungsniveaus für den Wechsel der Belastungsfrequenz von 0,1 Hz auf 1,0 Hz am größten ist. In Richtung der größten verwendeten Frequenz $f_p = 10,0$ Hz nimmt der Frequenzeinfluss ab, was den Ergebnissen von [Hohberg – 2004] entspricht (vgl. Abschnitt 2.2.5).

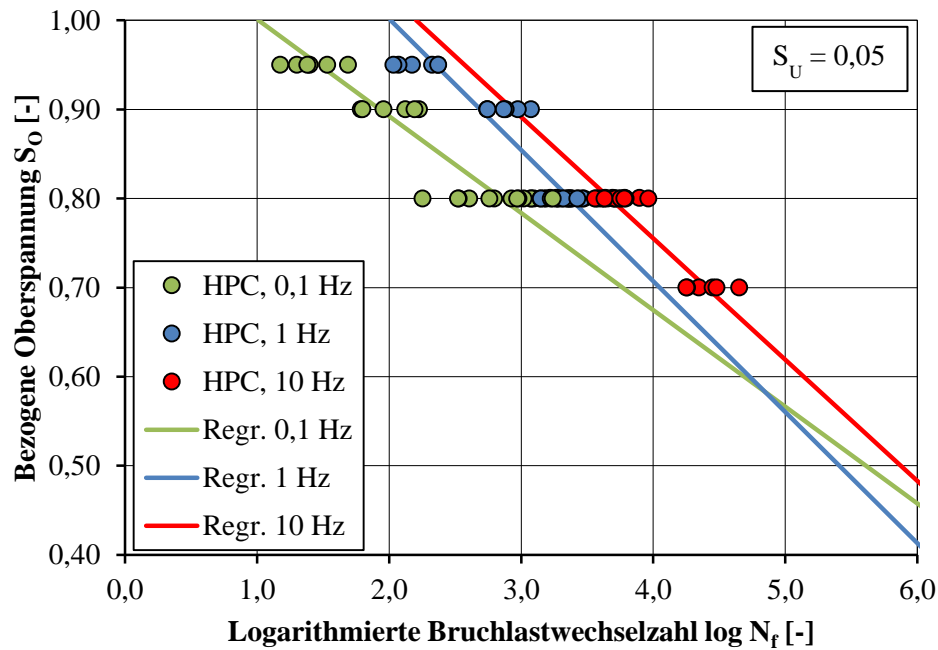


Abbildung 6.6: Regressionsgeraden der Bruchlastwechselzahlen für verschiedene Prüffrequenzen (Einzelwerte)

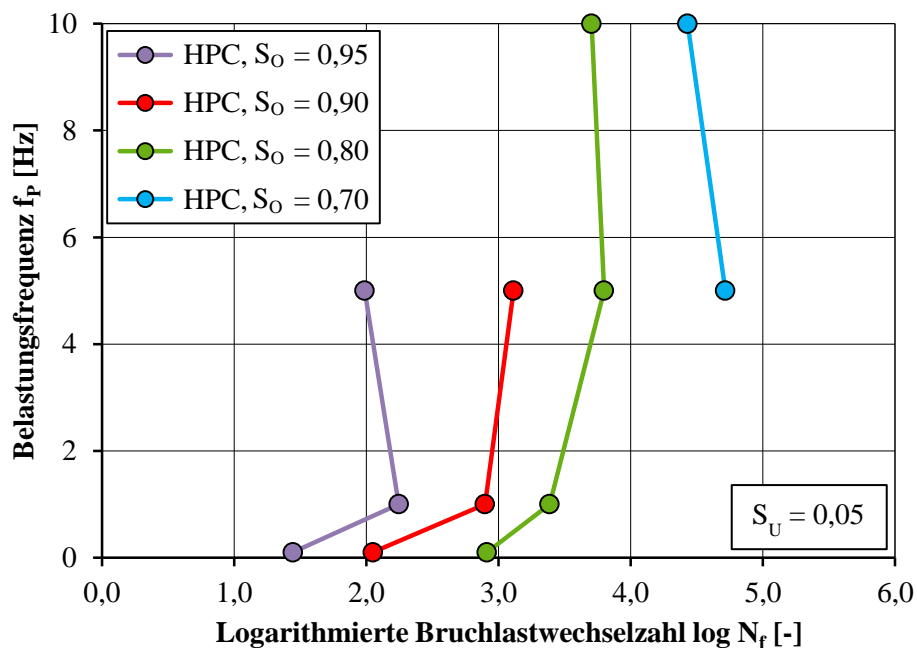


Abbildung 6.7: Einfluss der Belastungsfrequenz für verschiedene bezogene Oberspannungen (Mittelwerte)

In Abbildung 6.8 werden die eigenen Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen von [Holmen – 1979] und [Petković et al. – 1992] verglichen. [Holmen – 1979] untersuchte einen normalfesten Beton mit einer Druckfestigkeit von $f_{c,28d} = 40 \text{ N/mm}^2$ an Zylindern mit

$d/h = 100/250$ mm bei Prüffrequenzen von $f_p = 1,0$ Hz und $f_p = 5,0$ Hz. In [Petković et al. – 1992] sind unter anderem Versuche an einem hochfesten Beton mit einer Festigkeit von rund $f_{c,93d} = 75$ N/mm² dokumentiert. Diese Ermüdungsversuche wurden an Zylindern mit $d/h = 100/300$ mm bei einer Prüffrequenz von $f_p = 1,0$ Hz durchgeführt, wobei die Proben vor dem Austrocknen geschützt wurden.

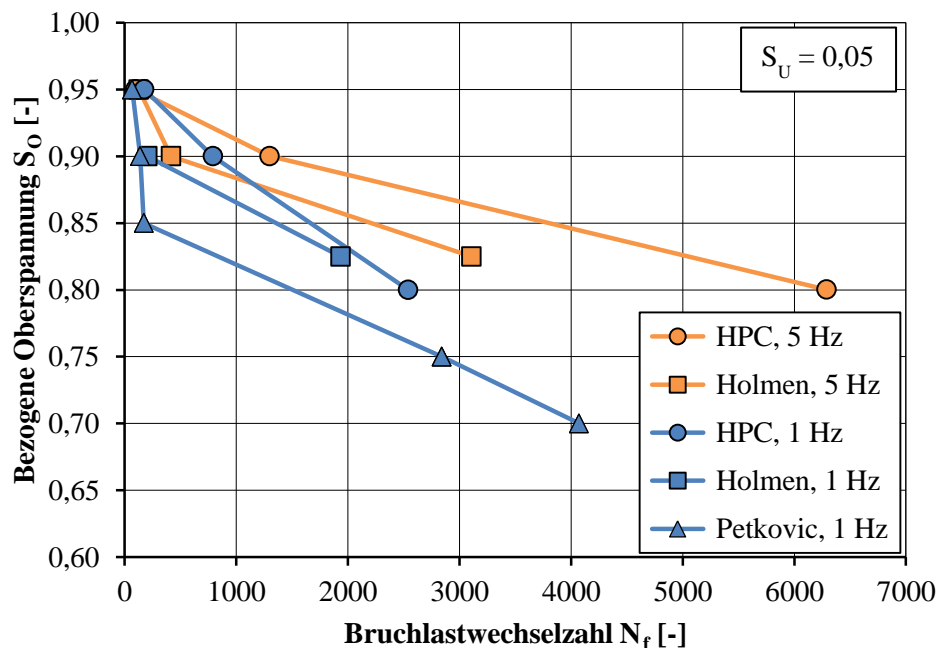


Abbildung 6.8: Vergleich mit in der Literatur dokumentierten Bruchlastwechselzahlen, Low-Cycle-Fatigue (Mittelwerte)

Die Versuchsergebnisse von [Holmen – 1979] zeigen ebenfalls, dass höhere Prüffrequenzen zu höheren Bruchlastwechselzahlen führen. Die Mittelwerte der Bruchlastwechselzahlen des normalfesten Betons sind für die Prüffrequenzen $f_p = 1,0$ Hz und $f_p = 5,0$ Hz kleiner als die des hier untersuchten hochfesten Betons. Die von [Petković et al. – 1992] für einen hochfesten Beton ermittelten Bruchlastwechselzahlen sind ebenfalls deutlich kleiner als die des hier untersuchten hochfesten Betons. Anhand dieses Vergleichs der Bruchlastwechselzahlen von Betonen verschiedener Festigkeiten ist zu sehen, dass auch für Prüffrequenzen $f_p < 10,0$ Hz kein Hinweis darauf besteht, dass höhere Betondruckfestigkeiten zu kleineren Bruchlastwechselzahlen führen (vgl. auch Abschnitt 6.4.2). In Abbildung 6.8 ist vielmehr zu sehen, dass der Frequenzeinfluss bei dem hier untersuchten hochfesten Beton stärker ausgeprägt ist als bei dem von [Holmen – 1979] untersuchten normalfesten Beton. Dieses könnte jedoch auch mit prüftechnischen Unterschieden in Zusammenhang stehen.

Im Folgenden werden die zyklischen Belastungsdauern bis zum Versagen bei verschiedenen Oberspannungsniveaus und Frequenzen betrachtet. Hierzu sind die logarithmierten Belastungsdauern $\log t_U$ bis zum Versagen in Abbildung 6.9 für sämtliche Versuche dargestellt. Infolge der Erhöhung der Belastungsfrequenz verkürzt sich die Belastungsdauer bis zum Ver-

sagen, wobei sich gleichzeitig die Bruchlastwechselzahlen erhöhen. Es ist deutlich erkennbar, dass die Belastungsdauer bis zum Versagen im Mittel umso kürzer ist, je höher die Belastungsfrequenz ist. Insofern werden die Ergebnisse, die z. B. in [Sparks / Menzies – 1973] bzw. [Sparks – 1982] für einen normalfesten Beton dokumentiert sind, für den untersuchten hochfesten Beton bestätigt.

Durch die Erhöhung der Belastungsfrequenz wird die Bruchlastwechselzahl nicht um das gleiche Maß vergrößert, wie die Dauer eines Lastwechsels bzw. die Belastungsdauer bis zum Versagen verkleinert wird. Darüber hinaus ist das Verhältnis der Erhöhung der Bruchlastwechselzahl zur Verkürzung der Belastungsdauer $\Delta N_f / \Delta t_U$ für unterschiedliche Frequenzwechsel unterschiedlich groß, wie anhand der Versuchsergebnisse ermittelt werden kann (Anhang A-3.1.1, Tabellen A 3.1 - 3.7).

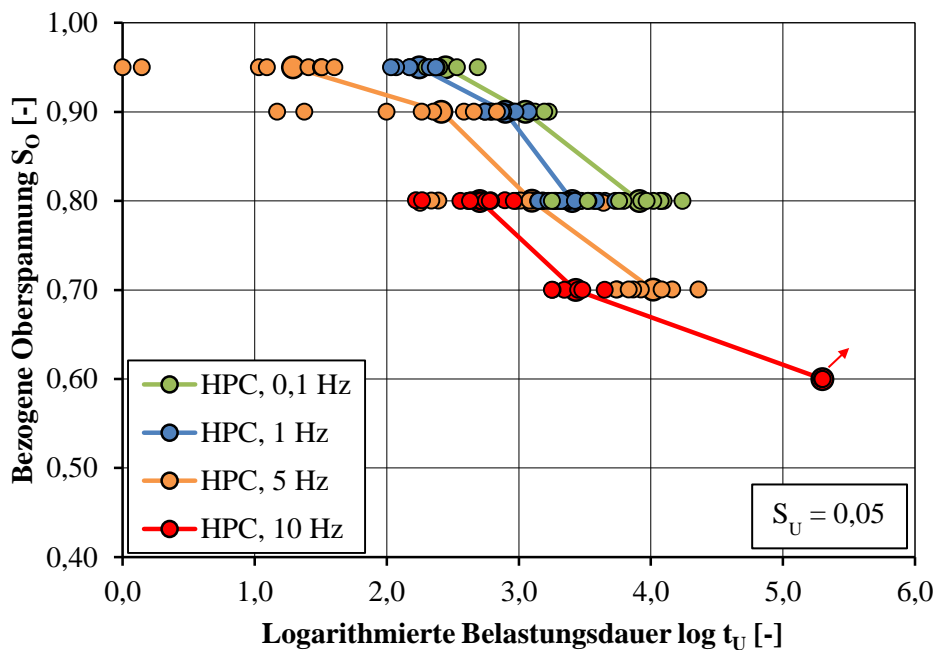


Abbildung 6.9: Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Belastungsdauer
(Einzel- und Mittelwerte)

Versuche mit dreiecksförmiger Belastung

Bisher konzentrierte sich die Auswertung ausschließlich auf die Ermüdungsversuche mit sinusförmiger Wellenform. Es wurden jedoch auch Dreiecksversuche mit verschiedenen Frequenzen durchgeführt. Diese Untersuchungen hatten zwar einen anderen Fokus (vgl. Abschnitt 4.4.2), ihre Ergebnisse sollen jedoch auch hinsichtlich eines Frequenzeinflusses ausgewertet werden. Die durchgeführten Versuche der Chargen B21 und B22 bei dreiecksförmiger zyklischer Belastung hatten Prüffrequenzen von $f_p = 0,1$ Hz bzw. $f_p = 0,09$ Hz und $f_p = 1,0$ Hz bzw. $f_p = 0,89$ Hz und damit konstante Be- und Entlastungsgeschwindigkeiten von $\dot{k} = 44,53 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ und $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$. Zusätzlich fanden zyklische Versuche mit dreiecks-

förmiger Beanspruchung an Probekörpern der Charge B23 für $S_0 = 0,80$ und Belastungsfrequenzen von $f_p = 0,98 \text{ Hz}$ und $f_p = 9,76 \text{ Hz}$ ($\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ und $\dot{k} = 4453 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$) statt.

Die logarithmierten Bruchlastwechselzahlen sind in Abbildung 6.10 dargestellt. Die Mittelwerte sind anhand größerer Symbole erkennbar. Es ist zu sehen, dass auch bei dreiecksförmiger Belastung bei beiden Beanspruchungsniveaus höhere Belastungsfrequenzen zu höheren Bruchlastwechselzahlen führen. Wie im Anhang A-3.1.2, Tabelle A 3.12 zu sehen ist, sind die Unterschiede der Mittelwerte jedoch nur teilweise signifikant. Anhand der logarithmierten Mittelwerte der Bruchlastwechselzahlen des Versuchsblocks E4 kann keine besondere Ausprägung des Frequenzeinflusses für eine der beiden Wellenformen festgestellt werden (vgl. Anhang A-3.1.2, Tabelle A 3.8).

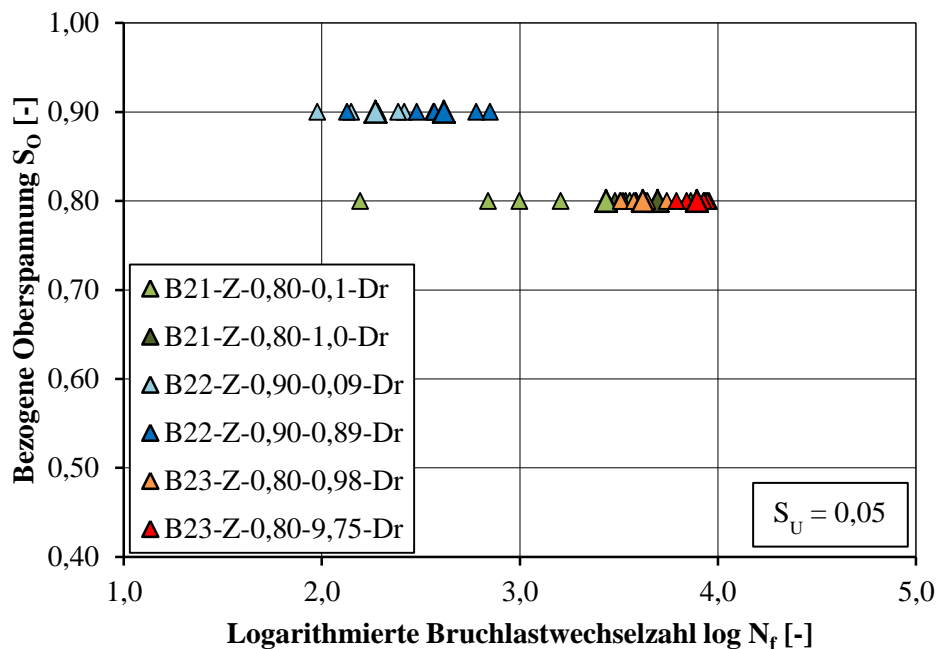


Abbildung 6.10: Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Bruchlastwechselzahlen der Dreiecksversuche

6.4.4 Einfluss der Wellenform

Aufgrund der bei sinusförmiger zyklischer Beanspruchung im Lastwechsel nicht konstanten Belastungsgeschwindigkeit ist es für die Überprüfung der „Geschwindigkeits-Druckfestigkeits-Hypothese“ sinnvoll, zyklische Versuche mit konstanten Belastungsgeschwindigkeiten durchzuführen. Zur Untersuchung des Einflusses der Wellenform auf das Ermüdungsverhalten des hochfesten Betons waren im Versuchsblock E4 Ermüdungsversuche mit dreiecksförmiger Wellenform sowie Vergleichsversuche mit sinusförmiger Beanspruchung vorgesehen. Die Versuchsserien der Dreiecks- und Sinusversuche hatten jeweils paarweise die gleiche bezogene Oberspannung und die gleiche Belastungsfrequenz als gemeinsame Belastungsparameter. Die Versuchsergebnisse für beide Wellenformen sind in Abbildung

6.11 bzw. in Abbildung 6.12 als Einzel- und Mittelwerte dargestellt. Die Mittelwerte sind als größere Symbole hervorgehoben.

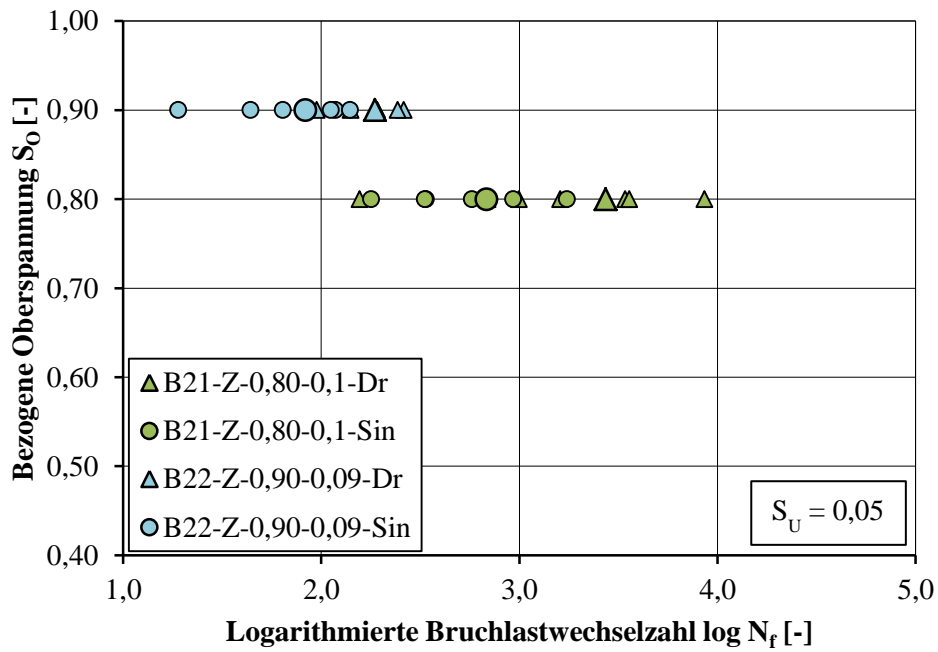


Abbildung 6.11: Einfluss der Wellenform auf die Bruchlastwechselzahlen, $f_p = 0,1$ Hz bzw. $f_p = 0,09$ Hz

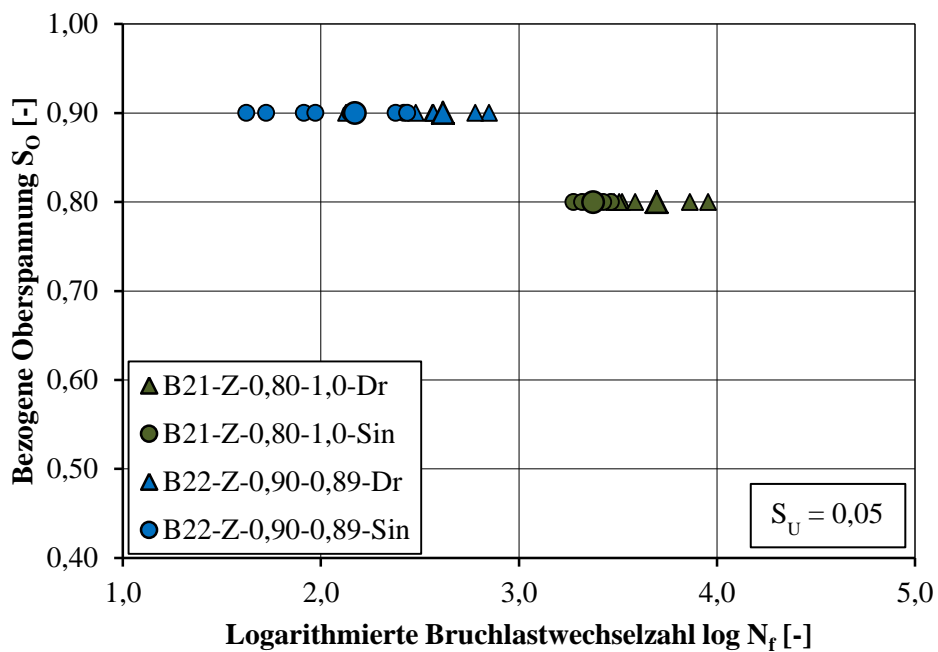


Abbildung 6.12: Einfluss der Wellenform auf die Bruchlastwechselzahlen, $f_p = 1,0$ Hz bzw. $f_p = 0,89$ Hz

Abbildung 6.11 und Abbildung 6.12 zeigen, dass die dreiecksförmige zyklische Beanspruchung jeweils im Mittel für beide Beanspruchungsniveaus und die verschiedenen Frequenzen zu höheren Bruchlastwechselzahlen führt als die sinusförmige Belastung. Die Ergebnisse für den hochfesten Beton stimmen mit den von [Tepfers et al. – 1973] bzw. [Weigler / Freitag – 1975] für normalfeste Betone ermittelten Ergebnissen diesbezüglich überein. Darüber hinaus ist erkennbar, dass der Effekt des Wechsels der Wellenform abhängig von der bezogenen Oberspannung und der Belastungsfrequenz ist. Die statistischen Auswertungen ergaben, außer für die zyklische Beanspruchung von $S_O = 0,80$ und $f_P = 0,1$ Hz, Hinweise darauf, dass die Mittelwerte der Bruchlastwechselzahlen beider Wellenformen signifikant unterschiedlich sein könnten (vgl. Anhang A-3.1.2, Tabelle A 3.13).

6.4.5 Vergleich der Bruchlastwechselzahlen des hochfesten Betons mit ausgewählten Regelwerken

Abschließend soll die Ermüdungsfestigkeit des hochfesten Betons mit den Vorgaben in ausgewählten Regelwerken verglichen werden. Für diesen Vergleich wurden die Wöhlerkurven nach Model Code 2010 [fib – 2013], Eurocode 2 [DIN EN 1992-1-1 – 2011] und [DIN EN 1992-2 – 2010] und Model Code 90 [CEB/FIP – 1993] für die bezogene Unterspannung von $S_U = 0,05$ ausgewertet. In Abbildung 6.13 sind diese Kurven zusammen mit den logarithmierten Bruchlastwechselzahlen sämtlicher Versuche mit sinusförmiger zyklischer Belastung als Mittelwerte dargestellt.

Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 beschrieben wurde, sind die Wöhlerkurven nach Model Code 90 und 2010 für Frequenzen $f > 0,1$ Hz und bezogene Oberspannungen $S_O < 0,90$ anwendbar. Im Eurocode 2 sind keine Anwendungsbeschränkungen angegeben. Der Vergleich der experimentell ermittelten Bruchlastwechselzahlen mit der Kurve nach Model Code 90 zeigt, dass die Versuchsergebnisse des untersuchten hochfesten Betons rechts von der Kurve liegen und damit vom Model Code 90 auf der sicheren Seite liegend beschrieben werden. Unter Berücksichtigung der Anwendungsbeschränkung der Kurve nach Model Code 2010 auf Frequenzen $f > 0,1$ Hz kann sowohl für die Wöhlerkurven aus Model Code 2010 als auch für die Kurven aus Eurocode 2 festgestellt werden, dass sie die Versuchsergebnisse des hochfesten Betons auf der sicheren Seite liegend abbilden.

Insbesondere im Bereich hoher bezogener Oberspannungen $S_O > 0,80$ werden die experimentell ermittelten Bruchlastwechselzahlen des hochfesten Betons von den Kurven der drei Regelwerke jedoch deutlich unterschätzt. Diese Unterschätzung der Bruchlastwechselzahlen im Bereich hoher bezogener Oberspannungen ist auf das allgemein übliche Vorgehen bei der Festlegung von Wöhlerkurven zurückzuführen.

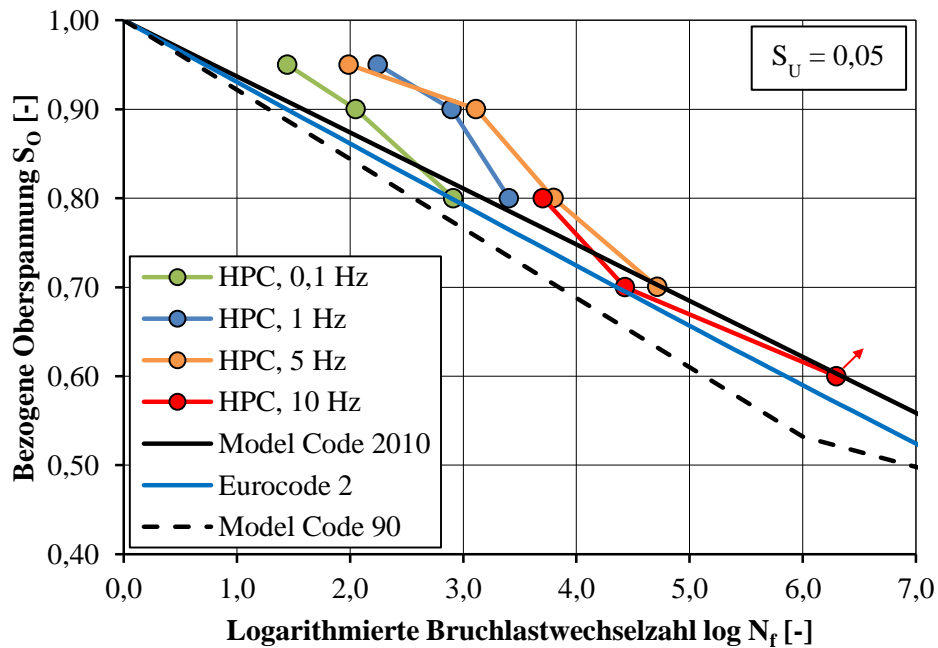


Abbildung 6.13: Bruchlastwechselzahlen im Vergleich mit Model Code 2010, Eurocode 2 und Model Code 90

Lineare Regressionen im halb-logarithmischen Raum zur Beschreibung von Ermüdungsfestigkeiten schneiden die Ordinate häufig bei einer bezogenen Oberspannung $S_0 > 1,0$ (vgl. auch Abbildung 6.6). Ein Schnittpunkt mit der Ordinate bei Werten von $S_0 > 1,0$ würde jedoch bedeuten, dass der Beton zyklische Oberspannungen, die größer als die Druckfestigkeit sind, aufnehmen kann. Ein Schnittpunkt im Bereich $S_0 > 1,0$ ist daher physikalisch nicht plausibel. Um einen solchen Schnittpunkt zu vermeiden, werden die Wöhlerkurven im Allgemeinen so ermittelt, dass sie die Ordinate bei $S_0 = 1,0$ schneiden, z. B. durch eine Drehung der Regressionsgeraden. Als Folge hiervon werden die Bruchlastwechselzahlen bei höheren bezogenen Oberspannungen von den Wöhlerkurven meistens unterschätzt.

Anhand der nicht-logarithmierten Darstellung in Abbildung 6.8 ist zu sehen, dass die Mittelwertkurven der Bruchlastwechselzahlen die Ordinate durchaus bei Werten von $S_0 \leq 1,0$ schneiden würden. Schnittpunkte der Regressionen mit der Ordinate im Bereich $S_0 > 1,0$ sind somit größtenteils auf das allgemein übliche Vorgehen bei der Ermittlung von Wöhlerkurven im halb-logarithmischen Raum zurückzuführen und spiegeln nicht das Ermüdungsverhalten von Beton wieder.

6.4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ermüdungsfestigkeit eines hochfesten Betons wurde unter Berücksichtigung von drei Belastungsparametern systematisch untersucht und in den Kontext von Ergebnissen aus der Literatur für verschiedene Betonfestigkeiten eingeordnet.

Im Bereich hoher bezogener Oberspannungen führen höhere Belastungsfrequenzen bei sinusförmiger und dreiecksförmiger Belastung zu höheren Bruchlastwechselzahlen. Dieser Effekt ist für höhere bezogene Oberspannungen stärker ausgeprägt. Die Belastungsdauer bis zum Bruch ist dabei umso kürzer, je höher die Belastungsfrequenz ist. Die Bruchlastwechselzahl wird dabei nicht um das gleiche Maß vergrößert, wie die Dauer eines Lastwechsels bzw. die Belastungsdauer bis zum Versagen verkleinert wird. Für sinusförmige und dreiecksförmige Beanspruchungen konnten Hinweise darauf gefunden werden, dass der Frequenzeinfluss bei Frequenzen im Bereich von $f_p = 10$ Hz und größer abnehmen könnte. Hinsichtlich verschiedener Wellenformen wurde festgestellt, dass dreiecksförmige zyklische Belastungen bei gleicher Frequenz und gleichem Beanspruchungsniveau zu höheren Bruchlastwechselzahlen führen als sinusförmige Belastungen.

Insgesamt zeigt sich, dass die Einflüsse der drei Belastungsparameter auf die Bruchlastwechselzahlen je nach Kombination mit anderen Belastungsparametern unterschiedlich ausgeprägt sind. Werden die Ergebnisse der Signifikanztests zur Mittelwerthomogenität betrachtet, so kann daraus jedoch abgeleitet werden, dass die Bruchlastwechselzahlen im Vergleich zur Belastungsfrequenz und der Wellenform, am deutlichsten von der bezogenen Oberspannung beeinflusst werden.

Dem Vergleich der für den hochfesten Beton ermittelten Bruchlastwechselzahlen mit den für Betone verschiedener Festigkeiten in der Literatur dokumentierten Bruchlastwechselzahlen konnten keine belastbaren Hinweise darauf entnommen werden, dass mit steigenden Druckfestigkeiten zwangsläufig abnehmende Ermüdungsfestigkeitswerte zu erwarten sind.

Sowohl Model Code 90, Model Code 2010 als auch Eurocode 2 bilden die Versuchsergebnisse des untersuchten hochfesten Betons auf der sicheren Seite liegend ab. Im Bereich hoher bezogener Oberspannungen werden die Bruchlastwechselzahlen jedoch deutlich unterschätzt. In diesem Bereich besteht also noch Potential, welches durch eine genauere Festlegung der Wöhlerkurven genutzt werden könnte.

Die Ermüdungsfestigkeit und die Einflüsse aus der bezogenen Oberspannung, der Belastungsfrequenz und der Wellenform wurden für einen hochfesten Beton untersucht und beschrieben. Für die drei untersuchten Belastungsparameter konnten Einflüsse auf die Bruchlastwechselzahlen festgestellt werden. Somit sind im nächsten Schritt weitergehende Untersuchungen dazu, ob diese Belastungsparameter auch die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen beeinflussen, sinnvoll.

6.5 Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen

6.5.1 Einordnung

In der Literatur sind nur wenige Aussagen zu Einflüssen der bezogenen Oberspannung, der Belastungsfrequenz und der Wellenform auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen zu finden (vgl. Abschnitt 2.2). Die Literaturlauswertungen zeigen, dass ein Einfluss der Oberspannung auf die Dehnungsentwicklung unter Ermüdungsbeanspruchung vereinzelt festgestellt wurde. Hinsichtlich des Vorhandenseins eines Einflusses der Oberspannung auf die Betonsteifigkeit sind widersprüchliche Aussagen in der Literatur zu finden [Petković et al. – 1992], [Holmen – 1979]. In den in der Literatur dokumentierten Untersuchungen konnte bisher jedoch nur eine geringe oder keine Beeinflussung der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung durch die Belastungsfrequenz und die Wellenform festgestellt werden [Holmen – 1979], [Tepfers et al. – 1973].

Im vorherigen Abschnitt wurde der Einfluss der bezogenen Oberspannung, der Belastungsfrequenz und der Wellenform auf die Bruchlastwechselzahlen des hochfesten Betons beschrieben. Hierauf aufbauend sollen diese drei Belastungsparameter auch im Hinblick auf ihren Einfluss auf die Dehnungs- bzw. Steifigkeitsentwicklungen untersucht werden. Für die systematische Untersuchung der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen stehen die Daten aus insgesamt 132 Versuchen zur Verfügung, bei denen besonderer Wert auf die genaue experimentelle Erfassung der Verformungen gelegt wurde (Versuchsblöcke E2, E4). Die Versuche wurden bei hohen bezogenen Oberspannungen im Bereich von $S_O = 0,95 - 0,80$, mit Belastungsfrequenzen von $f_p = 0,1$ Hz, $f_p = 1,0$ Hz und $f_p = 10,0$ Hz sowie bei sinusförmiger und dreiecksförmiger Belastung durchgeführt. Die bezogene Unterspannung betrug bei sämtlichen Versuchen $S_U = 0,05$.

In den folgenden Abschnitten 6.5.2 – 6.5.4 wird zunächst das für die Auswertung der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen unter Ermüdungsbeanspruchung erarbeitete Auswertungskonzept vorgestellt und die betrachteten Kenngrößen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung definiert. Die Anwendung dieses Auswertungskonzepts erfolgt dann in den anschließenden Abschnitten 6.5.5 - 6.5.7, in denen die Einflüsse der bezogenen Oberspannung, der Belastungsfrequenz und der Wellenform auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen systematisch ausgewertet werden. Im anschließenden Abschnitt 6.5.8 werden unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den vorherigen Abschnitten systematische Zusammenhänge einzelner Kenngrößen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen zur Bruchlastwechselzahl bzw. zur Belastungsdauer analysiert, in dem die Untersuchungsergebnisse einflussübergreifend betrachtet werden.

Die systematische Auswertung der Dehnungsentwicklungen unter Berücksichtigung der genannten Belastungsparameter ist die Basis für die Untersuchung möglicher Zusammenhänge zum Dehnungsverhalten bei monoton steigender Beanspruchung (Abschnitt 8.2) bzw. zum

Dehnungsverhalten bei Dauerstandbeanspruchung (Abschnitt 8.3). In Kapitel 5 wurde für monoton steigende Beanspruchungen u. a. festgestellt, dass die Beziehung zwischen Spannung und Dehnung abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit ist. Es ist daher zu überprüfen, ob dieser Einfluss auch anhand der Dehnungsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchungen zu erkennen ist. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse werden darüber hinaus zur Beurteilung der in der Literatur dokumentierten Hypothesen zum Ermüdungsverhalten von Betonen herangezogen (Kapitel 9). Zusätzlich sollen die aus der Literatur abgeleiteten Fragestellungen (F1 – F6) beantwortet werden (vgl. Abschnitt 3.2).

6.5.2 Auswertungskonzept

Sämtliche Ermüdungsversuche wurden kraftgerecht durchgeführt. Dementsprechend sind die Ober- und Unterlast bzw. die Mittellast und die Amplitude der Kraft versuchsseitig vorgegeben. In Abhängigkeit der Querschnittsfläche der Proben ergeben sich hieraus die Ober- und Unterspannung sowie die Spannung bei Mittellast und die Spannungsamplitude. Die hiervon abhängige Größe ist die Dehnung. So lassen sich im zyklischen Versuch Dehnungen bei Ober- und Unterspannung, Dehnungen bei Mittellast und die Amplituden der Dehnung ermitteln.

In den folgenden Abschnitten werden Einflüsse aus Oberspannungswechsel, Frequenzwechsel und aus dem Wechsel der Wellenform auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen untersucht. Um vergleichende Auswertungen der Vielzahl an experimentell ermittelten Dehnungsverläufen durchführen zu können, werden Kenngrößen definiert, die eine sinnvolle und zielorientierte vergleichende Auswertung ermöglichen.

Steifigkeit

Die Steifigkeit wird in Anlehnung an z. B. [Holmen – 1979], [Do et al. – 1993] als Sekantenmodul im Entlastungsast zwischen dem jeweiligen Minimum und Maximum der Lastwechsel ermittelt. Bei einer konstanten Spannungsamplitude beschreibt der Sekantenmodul die Änderung der Amplitude der Dehnung ε^A im Ermüdungsprozess. Der Sekantenmodul berechnet sich für jeden Lastwechsel nach folgender Gleichung:

$$E_s = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} \quad (6.4)$$

Eigene vergleichende Auswertungen des Sekantenmoduls bei Belastung und Entlastung haben gezeigt, dass diese für den untersuchten hochfesten Beton im überwiegenden Teil des Ermüdungsprozesses annähernd gleich sind. Lediglich zu Beginn der Belastung und direkt vor dem Versagen sind Unterschiede erkennbar.

Dehnungsmittellage

Bei der Festlegung von Kenngrößen ist zu beachten, dass sich die vor dem Start der zyklischen Belastung aufgebrachte Dehnung bei Mittellast, hier „Dehnungsmittellage“ genannt, zwischen den einzelnen Probekörpern unterscheidet. Gleichzeitig ist diese Dehnungsmittellage jedoch der Ausgangspunkt für die Dehnungen unter zyklischer Beanspruchung und beeinflusst somit die Werte der zyklischen Dehnungsentwicklung. Für die Vergleiche der Dehnungsentwicklungen verschiedener zyklischer Beanspruchungen werden daher hauptsächlich Dehnungsdifferenzen als Kenngrößen definiert, z. B. zur Dehnungsmittellage oder zwischen verschiedenen „Zeitpunkten“ im Ermüdungsprozess.

Bezugsgröße für die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen

Die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen werden in der Literatur uneinheitlich über der bezogenen Lastwechselzahl N/N_f oder über der Lastwechselzahl N (bzw. über der bezogenen Belastungsdauer t/t_U oder der Belastungsdauer t) dargestellt und ausgewertet. Beide Auswertungsvarianten können jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, wie im Folgenden erläutert wird.

Die bezogene Darstellung über N/N_f entspricht einer Normierung über die Bruchlastwechselzahl und ermöglicht Vergleiche der Dehnungsentwicklungen zwischen Versuchen mit (fast immer) unterschiedlichen Bruchlastwechselzahlen. Bei der Interpretation dieser Kurven wird häufig jedoch nicht beachtet, dass die Zunahme der Dehnung mit den Lastwechseln durch diese Normierung verzerrt dargestellt wird. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 6.14 bzw. Abbildung 6.15 die Dehnungsentwicklungen von zwei Versuchen mit zwei verschiedenen Frequenzen zum einen über der bezogenen Lastwechselzahl N/N_f und zum anderen über der Lastwechselzahl N dargestellt.

Die Darstellung über der bezogenen Lastwechselzahl N/N_f (Abbildung 6.14) suggeriert für beide Versuche eine relativ gute Übereinstimmung der Steigungen der Dehnungsentwicklungen in der zweiten Phase. Die Dehnungsentwicklungen dargestellt über der Lastwechselzahl N (Abbildung 6.15) zeigen jedoch, dass deutliche Unterschiede zwischen den Dehnungsentwicklungen bestehen, wobei die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase bei dem Versuch mit $f_p = 0,1$ Hz deutlich größer ist. Die bezogene Darstellung liefert somit nur eine qualitative Bewertungsmöglichkeit des dreiphasigen Verlaufs sowie der Höhenlage der Dehnungsentwicklungen. Entsprechendes gilt ebenfalls hinsichtlich der Belastungsdauer / bezogenen Belastungsdauer sowie für die Steifigkeitsentwicklungen.

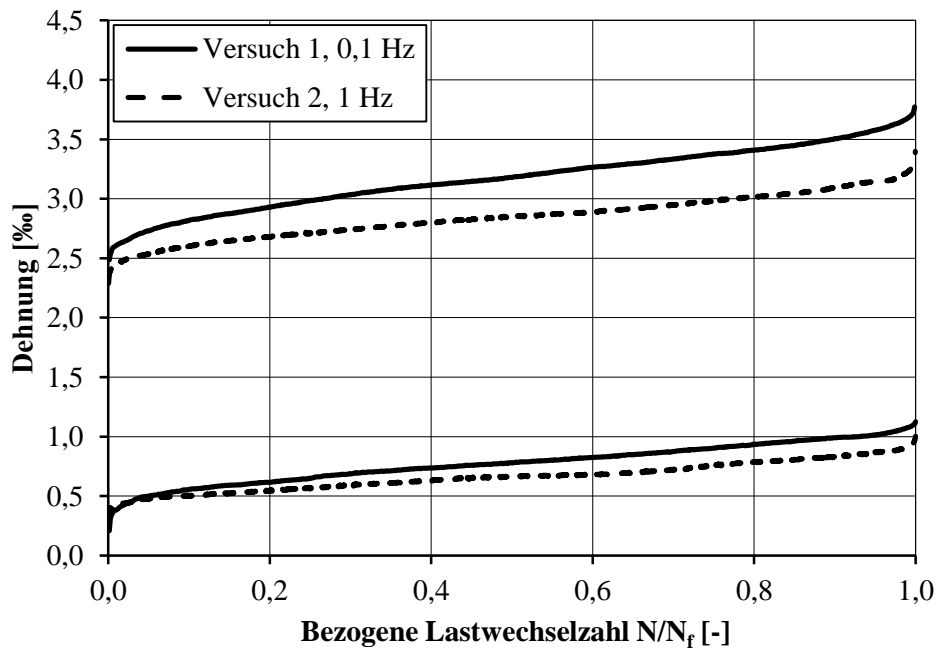


Abbildung 6.14: Dehnungsentwicklungen dargestellt über der bezogenen Lastwechselzahl N/N_f

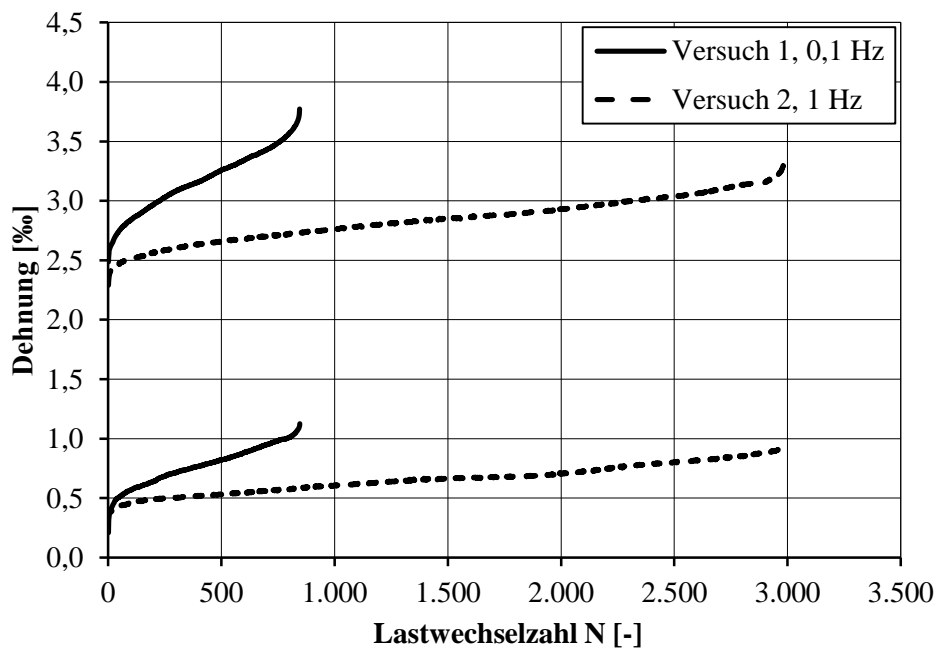


Abbildung 6.15: Dehnungsentwicklungen dargestellt über der Lastwechselzahl N

Im Fokus der folgenden Auswertungen stehen die Auswirkungen verschiedener zyklischer Belastungsparameter auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen. Um die Unterschiede analysieren zu können, müssen daher die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen über die absoluten Lastwechselzahlen bzw. über die absolute Belastungsdauer betrachtet werden. Vergleiche der Dehnungsentwicklungen verschiedener Versuche erfolgen aufgrund ihrer bereichsweise unterschiedlichen Charakteristiken bereichsweise für gleiche Phasen. Für jeden

Versuch wurde daher zunächst die Phaseneinteilung bestimmt. Die Anzahl der Lastwechsel in den verschiedenen Phasen ist dabei aufgrund der (fast immer) unterschiedlichen Bruchlastwechselzahlen zwischen den Versuchen ebenfalls (fast immer) unterschiedlich.

Grundsätzlich ist es bei Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen aus Ermüdungsversuchen möglich, diese über die Lastwechselzahl oder über die Belastungsdauer auszuwerten. Wie bereits zuvor in Abschnitt 6.4.3 erläutert wurde, wird die Bruchlastwechselzahl bei Erhöhung der Belastungsfrequenz nicht um das gleiche Maß vergrößert wie die Belastungsdauer verkleinert wird. Dieses hat z. B. Auswirkungen auf die Auswertung der Steigungen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 6.16 die Dehnungsentwicklungen aus Abbildung 6.14 bzw. Abbildung 6.15 ergänzend über der Belastungsdauer dargestellt.

Bei der Darstellung der Dehnungsentwicklungen über der Lastwechselzahl N (Abbildung 6.15) ergibt sich für den Versuch mit der niedrigeren Belastungsfrequenz $f_p = 0,1$ Hz eine größere Steigung als für den Versuch bei $f_p = 1,0$ Hz. Aufgetragen über der Belastungsdauer t ist die Steigung der Dehnungsentwicklungen des Versuchs mit $f_p = 0,1$ Hz jedoch kleiner als die des Versuchs mit $f_p = 1,0$ Hz (Abbildung 6.16). Das Verhältnis der über die Lastwechselzahl ausgewerteten Steigungen bei verschiedenen Frequenzen ist also anders als das Verhältnis der über die Belastungsdauer ausgewerteten Steigungen.

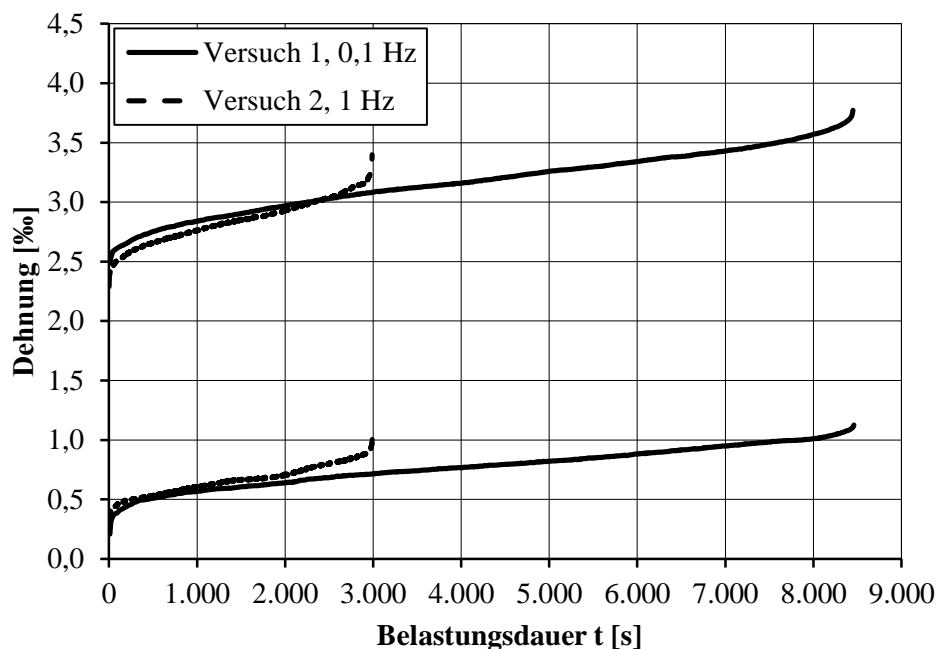


Abbildung 6.16: Dehnungsentwicklungen dargestellt über der Belastungsdauer t

Die systematischen Auswertungen der Steigungen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen werden im Folgenden zunächst mit Bezug zur Lastwechselzahl durchgeführt (Abschnitte 6.5.5 – 6.5.7). Auf diese Weise kann der Zuwachs an Dehnung bzw. die Degradation der Stei-

figkeit pro Lastwechsel bestimmt werden. Bei den Vergleichen von zyklischen Versuchen und Dauerstandversuchen ist der Bezug zur Belastungsdauer unumgänglich. Zur Vorbereitung dieser Vergleiche und zu Beurteilung, ob ausgewählte Kenngrößen einen Bezug zur Lastwechselzahl oder zur Belastungsdauer zeigen, wird bei den einflussübergreifenden Auswertungen auch die Belastungsdauer berücksichtigt (Abschnitt 6.5.8).

Bezeichnung der Steigung in der zweiten Phase

In der Literatur wird die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase häufig als „Dehnrate“ oder „Dehngeschwindigkeit“ bezeichnet und mit $\dot{\varepsilon}$ bezeichnet (vgl. z. B. [Petković et al. – 1992], [Medeiros et al. – 2013]). Selbst bei der Ermittlung der Steigung bezogen auf die Dauer der Belastung in einer bestimmten Phase ist diese Bezeichnung nicht korrekt, da kein kontinuierlicher Dehnungsverlauf, sondern die Peaks der Dehnungsspiele ausgewertet werden. Es besteht also ein grundsätzlicher Unterschied zu den z. B. in Kapitel 5 untersuchten Dehngeschwindigkeiten. Zur Differenzierung werden die Steigungen in den drei Phasen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung im Folgenden mit einem Überstrich gekennzeichnet ($\bar{\varepsilon}$ bzw. \bar{E}).

Der Zustand des Bruchs

Das Versagen im zyklischen Versuch erfolgt schlagartig und entspricht einem kurzfristig vorhandenen, hochgradig instabilen Zustand, bei dem die Verformungen rasant zunehmen. Darüber hinaus tritt das Versagen bei Ermüdungsversuchen nicht unbedingt im Moment des Erreichens der vorgegebenen Oberlast, sondern meistens in einem Bereich davor bzw. danach ein. Das heißt, beim Versagen herrschen bei verschiedenen Proben unterschiedliche Beanspruchungen. Bei der Auswertung der Dehnungsentwicklungen wurden daher zum einen die Bruchdehnungen im Zustand des Versagens und zum anderen, als zusätzliche Größe, die sogenannten „Enddehnungen“, das heißt die Dehnungen bei Ober- bzw. Unterspannung im letzten Lastwechsel vor dem Versagen, betrachtet. Der Verlauf des Sekantenmoduls wird ebenfalls nur bis zu diesem letzten Lastwechsel ausgewertet. Dieser letzte Lastwechsel vor dem Versagen der Probe wird mit dem Index $N/N_f = 1,0$ bezeichnet.

6.5.3 Verlauf der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen

Bevor die Einflüsse auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen unter Ermüdungsbeanspruchung detailliert betrachtet werden, sollen für den hochfesten Beton zunächst die grundsätzlichen Charakteristiken der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen beschrieben werden.

Verlauf und Phasen der Dehnungsentwicklungen

Die ermittelten Dehnungsentwicklungen bei Ober- und Unterspannung für die verschiedenen zyklischen Beanspruchungen zeigen alle den bereits von normalfesten Betonen bekannten dreiphasigen Verlauf. Die erste Phase beinhaltet dabei einen überproportionalen Anstieg der Dehnungen. Daran schließt sich die zweite Phase mit einem linearen Anstieg der Dehnungen an. Abschließend nehmen die Dehnungen in der dritten Phase erneut überproportional bis zum Versagen des Betons zu. Die Phasenübergänge der Dehnungsverläufe wurden für jeden Versuch grafisch ermittelt. Im Mittel über alle Versuchsserien erfolgte der Übergang von der ersten zur zweiten Phase bei einer bezogenen Lastwechselzahl von $N/N_f \approx 0,11$ und der Übergang von der zweiten zur dritten Phase bei $N/N_f \approx 0,93$. Phase II mit einem annähernd linearen Dehnungszuwachs pro Lastwechsel umfasste somit im Mittel über 80 % des Ermüdungsprozesses. In Abbildung 6.17 sind die Dehnungsentwicklungen einer Versuchsserie beispielhaft abgebildet.

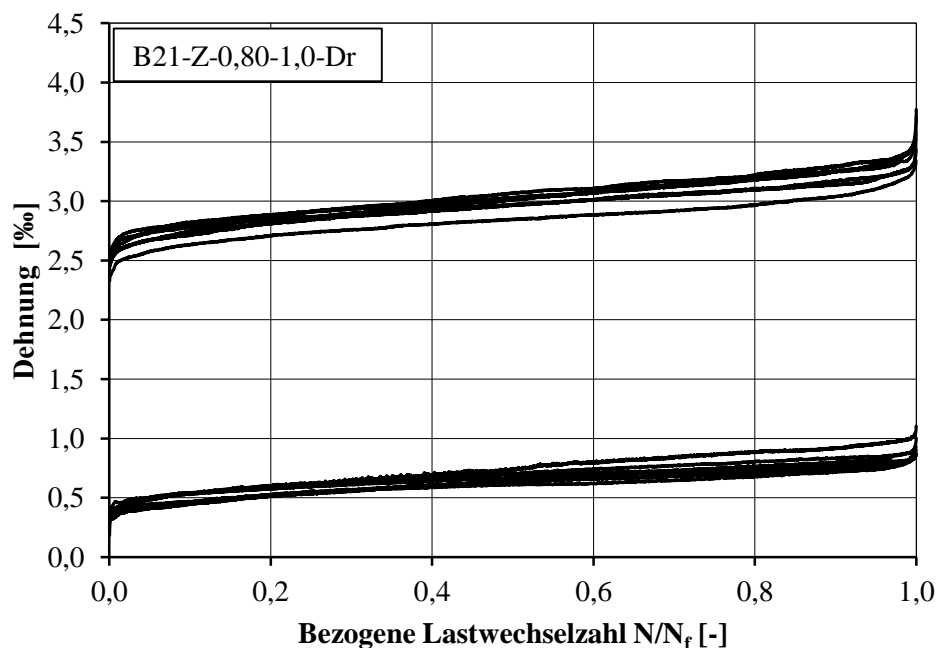


Abbildung 6.17: Beispielhafte Darstellung von Dehnungsentwicklungen

Wie bereits im Abschnitt 2.2.1 erläutert wurde, sind in der Literatur für hochfeste Betone Phasenübergänge im Bereich von $N/N_f = 0,10 - 0,13$ und $N/N_f = 0,75 - 0,85$ zu finden. In [Wefer – 2010] werden die Phasenübergänge für einen ultra-hochfesten Beton zu $N/N_f = 0,05$ und $N/N_f = 0,95$ bestimmt. Im Vergleich zu den in der Literatur enthaltenen Angaben für hochfeste Betone zeigt der hier untersuchte hochfeste Beton eine ähnlich lange Phase I, aber eine deutlich kürzere Phase III. Die Länge der dritten Phase ähnelt somit eher dem von [Wefer – 2010] untersuchten ultra-hochfesten Beton.

Verlauf der Steifigkeitsentwicklung

Die Steifigkeitsentwicklungen einer Versuchsserie sind in Abbildung 6.18 beispielhaft dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Steifigkeit über die Lastwechsel insgesamt abnimmt. Der Verlauf des Sekantenmoduls über die Lastwechsel kann, ähnlich wie die Dehnungsentwicklung, grundsätzlich in drei Phasen unterteilt werden. Weiterhin ist erkennbar, dass die Steifigkeitsentwicklungen uneinheitlicher verlaufen als die Dehnungsentwicklungen (vgl. Abbildung 6.17). Zusätzlich sind die einzelnen Phasen wesentlich weniger deutlich ausgeprägt als die der Dehnungsentwicklung. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass die Änderung der Amplitude der Dehnung ε^A im Ermüdungsprozess weniger ausgeprägt ist, als die Änderung der Dehnung.

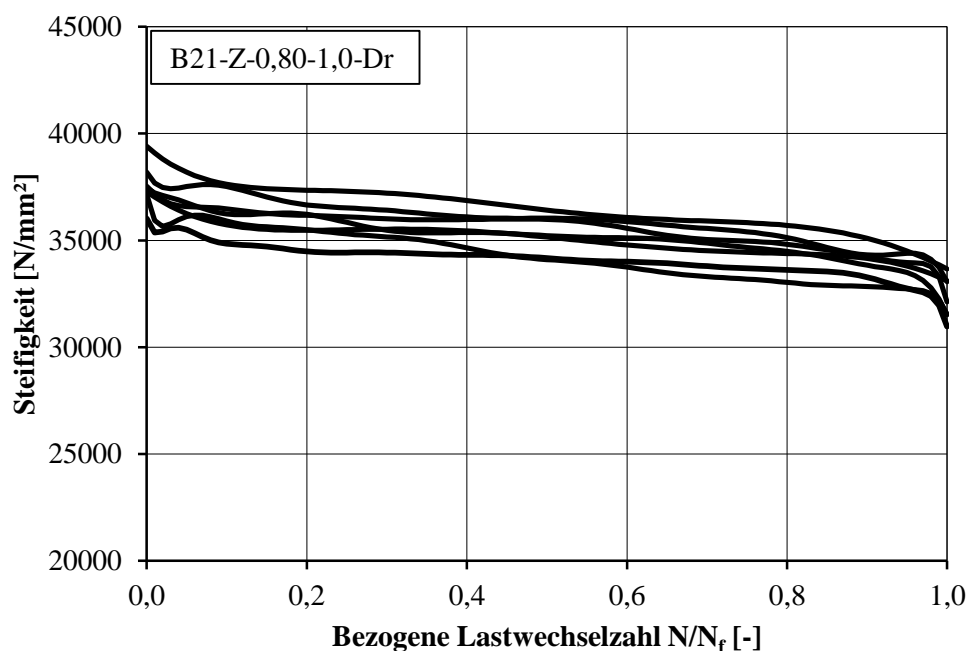


Abbildung 6.18: Beispielhafte Darstellung von Steifigkeitsentwicklungen
(auf Messdaten angepasste Kurvenverläufe)

6.5.4 Kenngrößen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung

Die verwendeten Kenngrößen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung wurden unter Berücksichtigung in der Literatur verwendeter Kenngrößen (Abschnitt 2.2) festgelegt. Die Dehnungsentwicklung wird durch folgende Kenngrößen beschrieben. Der tiefgestellte Index zeigt jeweils an, ob sich die Kenngröße auf die Dehnung bei Ober- oder Unterspannung bezieht. Der hochgestellte Index bezeichnet den betrachteten „Zeitpunkt“ im Ermüdungsprozess, ausgedrückt durch die bezogene Lastwechselzahl N/N_f bzw. durch Buchstaben für besondere „Zeitpunkte“ im Ermüdungsprozess. Die Werte der Kenngrößen der Dehnungsentwicklungen sind in Anhang A-3.2.1, Tabelle A 3.14 – A 3.20 zusammengestellt.

Allgemein:

$\Delta N^{I;II;III}$	[-]	Anzahl der Lastwechsel in den Phasen I, II bzw. III
N_f	[-]	Bruchlastwechselzahl
$\Delta t^{I;II;III}$	[s]	Dauer der Phasen I, II bzw. III
t_U	[s]	Belastungsdauer bis zum Versagen
I/II	[-]	Übergang von Phase I zu Phase II
II/III	[-]	Übergang von Phase II zur Phase III

Kenngrößen der Dehnungsentwicklung:

ε^M	[‰]	Dehnung bei der vor dem Start der zyklischen Beanspruchung aufgetragenen Mittellast, „Dehnungsmittellage“
ε^B	[‰]	Bruchdehnung beim Eintritt des Ermüdungsversagens
$\varepsilon_O^{N/N_f}, \varepsilon_U^{N/N_f}$	[‰]	Dehnung bei Ober- bzw. Unterspannung bei einer bestimmten bezogenen Lastwechselzahl N/N_f $\varepsilon_O^{0,0}, \varepsilon_U^{0,0}$ Anfangsdehnung, im ersten Lastwechsel $\varepsilon_O^{1,0}, \varepsilon_U^{1,0}$ Enddehnung, im letzten vollständigen Lastwechsel
$\varepsilon_O^{I/II}, \varepsilon_O^{II/III};$ $\varepsilon_U^{I/II}, \varepsilon_U^{II/III}$	[‰]	Dehnung bei Ober- bzw. Unterspannung an den Übergängen zwischen Phase I und Phase II bzw. Phase II und Phase III.
$\Delta \varepsilon_O^{0,0;M}, \Delta \varepsilon_U^{0,0;M}$	[‰]	Differenz der Anfangsdehnung bei Ober- bzw. Unterspannung zur Dehnungsmittellage $\Delta \varepsilon_O^{0,0;M} = \varepsilon_O^{0,0} - \varepsilon^M ; \Delta \varepsilon_U^{0,0;M} = \varepsilon_U^{0,0} - \varepsilon^M $
$\Delta \varepsilon_O^{1,0;M}, \Delta \varepsilon_U^{1,0;M}$	[‰]	Differenz der Enddehnung bei Ober- bzw. Unterspannung zur Dehnungsmittellage $\Delta \varepsilon_O^{1,0;M} = \varepsilon_O^{1,0} - \varepsilon^M ; \Delta \varepsilon_U^{1,0;M} = \varepsilon_U^{1,0} - \varepsilon^M $
$\Delta \varepsilon^{B;M}$	[‰]	Differenz der Bruchdehnung zur Dehnungsmittellage $\Delta \varepsilon^{B;M} = \varepsilon^B - \varepsilon^M $
$\Delta \varepsilon_O^{I;II;III}, \Delta \varepsilon_U^{I;II;III}$	[‰]	Dehnungszuwachs in Phase I, II bzw. III der Dehnungsentwicklung
$\Delta \varepsilon_O^{0,0-1,0}, \Delta \varepsilon_U^{0,0-1,0}$	[‰]	Gesamtdehnungszuwachs bei Ober- bzw. Unterspannung im Ermüdungsprozess vom ersten bis zum letzten vollständigen Lastwechsel

$$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{I;II;III}, \bar{\varepsilon}_{U,N}^{I;II;III}$$

[-] Steigung der Dehnungsentwicklung in den verschiedenen Phasen bezogen auf die Lastwechselzahl (N). Aufgrund des nichtlinearen Verlaufs der Dehnungsentwicklung in Phase I und III entspricht dieser Wert in diesen Phasen einer idealisierten Steigung.

$$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{I;III} = \frac{\Delta \varepsilon_O^{I;III}}{\Delta N^{I;III}}; \bar{\varepsilon}_{U,N}^{I;III} = \frac{\Delta \varepsilon_U^{I;III}}{\Delta N^{I;III}};$$

$$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{II} = \text{Re g}(\varepsilon_O^{II}(N)); \bar{\varepsilon}_{U,N}^{II} = \text{Re g}(\varepsilon_U^{II}(N))$$

$$\bar{\varepsilon}_{O,t}^{I;II;III}, \bar{\varepsilon}_{U,t}^{I;II;III}$$

[s⁻¹] Steigung der Dehnungsentwicklung in den verschiedenen Phasen bezogen auf die Dauer (t). Aufgrund des nichtlinearen Verlaufs der Dehnungsentwicklung in Phase I und III entspricht dieser Wert in diesen Phasen einer idealisierten Steigung.

$$\bar{\varepsilon}_{O,t}^{I;III} = \frac{\Delta \varepsilon_O^{I;III}}{\Delta t^{I;III}}; \bar{\varepsilon}_{U,t}^{I;III} = \frac{\Delta \varepsilon_U^{I;III}}{\Delta t^{I;III}};$$

$$\bar{\varepsilon}_{O,t}^{II} = \text{Re g}(\varepsilon_O^{II}(t)); \bar{\varepsilon}_{U,t}^{II} = \text{Re g}(\varepsilon_U^{II}(t))$$

$$\Delta \bar{\varepsilon}_N^{II}$$

[-] Steigungsdifferenz zwischen der Steigung bei Ober- und Unter-
spannung bezogen auf die Lastwechselzahl (N) in der zweiten
Phase der Dehnungsentwicklung.

$$\Delta \bar{\varepsilon}_N^{II} = \bar{\varepsilon}_{O,N}^{II} - \bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$$

In Abbildung 6.19 sind die Kenngrößen der Dehnungsentwicklungen bei Oberspannung schematisch dargestellt. Die Steigungen in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung wurden in Anlehnung an [Petković – 1991] mit Hilfe linearer Regressionen ermittelt. Das Bestimmtheitsmaß der Regression diente dabei der Überprüfung der Phaseneinteilung.

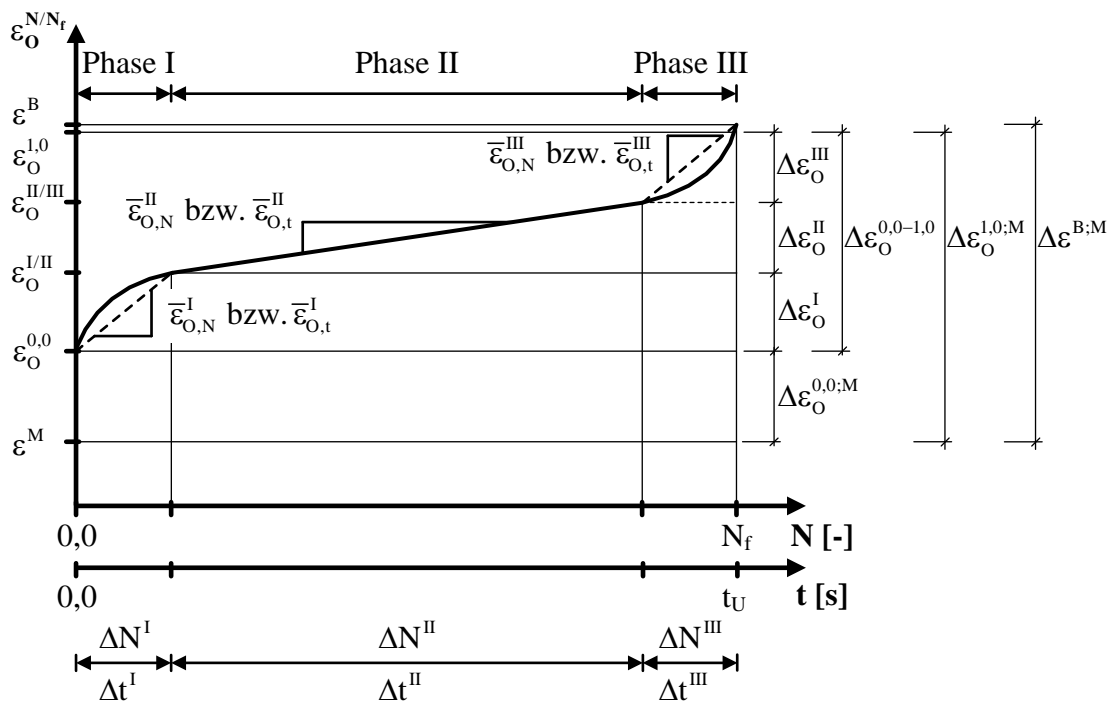


Abbildung 6.19: Kenngrößen der Dehnungsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruch
(bei Oberspannung)

Die verwendeten Kenngrößen zur Beschreibung der Steifigkeitsentwicklungen sind im Folgenden zusammengestellt. Der tiefgestellte Index zeigt an, dass es sich um den Sekantenmodul handelt. Der hochgestellte Index bezeichnet den betrachteten Zeitpunkt im Ermüdungsprozess, ausgedrückt durch die bezogene Lastwechselzahl N/N_f . Die Werte der Kenngrößen der Steifigkeitsentwicklungen sind in Anhang A-3.2.1, Tabelle A 3.21 – A 3.27 zusammengestellt.

Kenngrößen der Steifigkeitsentwicklung:

E_S^{N/N_f}	$[N/mm^2]$	Sekantenmodul bei einer bestimmten bezogenen Lastwechselzahl N/N_f
		$E_S^{0,0}$ Anfangssteifigkeit im ersten Lastwechsel
		$E_S^{1,0}$ Endsteifigkeit im letzten vollständigen Lastwechsel
$E_S^{I/II},$ $E_S^{II/III}$	$[N/mm^2]$	Steifigkeit an den Übergängen zwischen Phase I und Phase II bzw. Phase II und Phase III
$\Delta E_S^{0,0-1,0}$	[%]	Prozentualer Steifigkeitsverlust vom ersten bis zu letzten vollständigen Lastwechsel. Bezugswert: Steifigkeit im ersten Lastwechsel
		$\Delta E_S^{0,0-1,0} = \frac{E_S^{0,0} - E_S^{1,0}}{E_S^{0,0}} \cdot 100$

ΔE_S^{II}	[%]	Prozentualer Steifigkeitsverlust in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung. Bezugswert: Steifigkeit im ersten Lastwechsel $\Delta E_S^{\text{II}} = \frac{E_S^{1/\text{II}} - E_S^{\text{II}/\text{III}}}{E_S^{0,0}} \cdot 100$
$\bar{E}_{S,N}^{\text{II}}$	[N/mm ²]	Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase <u>bezogen auf die Lastwechselzahl (N)</u> $\bar{E}_{S,N}^{\text{II}} = \text{Reg}(E_S^{\text{II}}(N))$
$\bar{E}_{S,t}^{\text{II}}$	[N/mm ² ·s ⁻¹]	Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase <u>bezogen auf die Dauer (t)</u> $\bar{E}_{S,t}^{\text{II}} = \text{Reg}(E_S^{\text{II}}(t))$

Das Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase wurde wiederum jeweils mittels einer linearen Regressionsanalyse bestimmt. In Abbildung 6.20 sind die Kenngrößen zur Beschreibung der Steifigkeitsentwicklungen dargestellt. Der Auswertung der Steifigkeitsentwicklungen wurde ebenfalls die Phaseinteilung der Dehnungsentwicklungen zugrunde gelegt, um so einheitliche Betrachtungszeiträume zu gewährleisten.

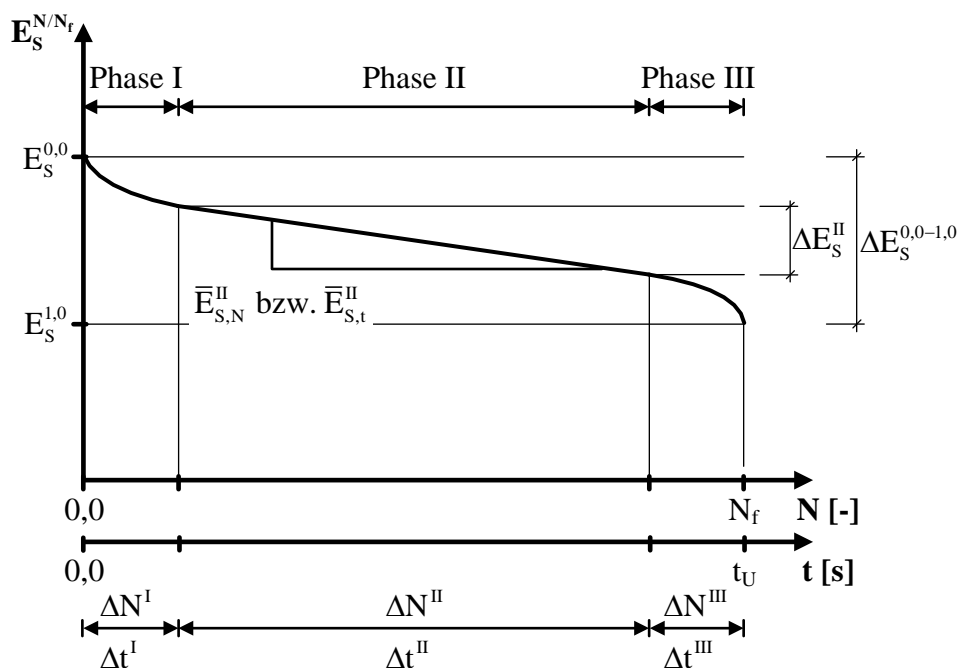


Abbildung 6.20: Kenngrößen der Steifigkeitsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung

Vorgehen bei der Datenauswertung

Erwartungsgemäß zeigte sich in den eigenen Untersuchungen, dass die Bruchlastwechselzahlen Streuungen unterliegen. Gleichzeitig ergaben die statistischen Auswertungen der Bruchlastwechselzahlen teilweise Hinweise auf signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Chargen (vgl. Abschnitt 6.4.3). Auch die ermittelten Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen unterliegen Streuungen. Um trotzdem Aussagen über die Einflüsse der untersuchten Belastungsparameter auf das Materialverhalten treffen zu können, werden die zuvor festgelegten Kenngrößen als Mittelwerte ausgewertet und miteinander verglichen.

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse zu den Streuungen der Bruchlastwechselzahlen und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass sehr kleine Größenordnungen von Verformungen betrachtet werden, werden die Kenngrößen ausschließlich innerhalb einer Charge für die gleiche zyklische Beanspruchung gemittelt. Gleichzeitig werden die Einflüsse aus den Belastungsparametern zunächst jeweils nur anhand von Versuchsserien einer Charge untersucht, um so Chargeneinflüsse auf die Auswertungsergebnisse zu vermeiden. Eine Verallgemeinerung der Erkenntnisse ist trotzdem möglich, wenn vergleichbare Ergebnisse zu einem Einfluss für verschiedene Chargen und/oder Beanspruchungskombinationen ermittelt werden können.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die jeweiligen Veränderungen der Kenngrößen infolge der Änderung der Belastungsparameter untersucht. Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten diese Veränderungen der Kenngrößen auszuwerten: prozentual oder absolut. Für die Beurteilung der Einflüsse auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen ist die prozentuale Auswertung vorteilhaft, da so die Größenordnung eines Einflusses relativ zum Ausgangswert bewertet wird. Für die folgenden Abschnitte 6.5.5 – 6.5.7 wurden daher prozentuale Änderungen der Kenngrößen infolge der verschiedenen Einflüsse ausgewertet. Dabei werden die Belastungsparameter immer in Richtung höherer Bruchlastwechselzahlen verändert (z. B. Erhöhung der Belastungsfrequenz). Der prozentuale Wert der Veränderung einer Kenngröße wird im Bezug zum jeweiligen Ausgangswert der Kenngröße vor der Veränderung des Belastungsparameters berechnet.

Beispiel: $\varepsilon_1 = 2,95\%$ für $f_P = 0,1$ Hz und $\varepsilon_2 = 2,85\%$ für $f_P = 1,0$ Hz

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = 2,85 - 2,95 = -0,10\% \text{ und } \Delta\varepsilon = -0,10 / 2,95 = -0,034 \hat{=} -3,4\%$$

Ergebnis: Infolge der Erhöhung der Belastungsfrequenz kommt es zu einer Verkleinerung der Kenngröße um 3,4 %

In den entsprechenden Übersichtstabellen in den Abschnitten 6.5.5 – 6.5.7 sind die Richtungen der Veränderung dargestellt. „Plus“ symbolisiert eine Zunahme der jeweiligen Kenngröße und „Minus“ eine Abnahme. Kleine Änderungen im Bereich von $-5\% \leq \delta \leq 5\%$ können aufgrund der Streuungen nicht eindeutig der Änderung des Belastungsparameters zugeordnet werden. Diese nicht eindeutigen Veränderungen der Kenngrößen werden in den Übersichtsta-

bellenden durch einen „Kreis“ symbolisiert. Die absoluten und prozentualen Werte sind in Anhang A-3.2.2, A-3.2.3 bzw. A-3.2.4 tabellarisch zusammengestellt. Bei Vergleichen zwischen verschiedenen Einflüssen ist zu beachten, dass die Bezugswerte der einzelnen Prozentwerte in den meisten Fällen unterschiedlich sind.

Im Anhang A-3.2.2, A-3.2.3 bzw. A-3.2.4 sind auch die für die verschiedenen Versuchsserien gemittelten Dehnungsentwicklungen dargestellt. Die Zusammenstellungen in den jeweiligen Diagrammen entsprechen der Reihenfolge der betrachteten Versuchsserien in den vergleichenden Auswertungen. Die Dehnungsentwicklungen bei verschiedenen bezogenen Oberspannungen sind in unterschiedlichen Farben dargestellt. Bei der Darstellung der Einflüsse der beiden anderen Belastungsparameter sind miteinander zu vergleichende Kurven in einer Farbe dargestellt. Die Ausgangsdehnungsentwicklung des Vergleichs ist jeweils als durchgehende Kurve und die Dehnungsentwicklung nach Änderung des Belastungsparameters als gestrichelte Kurve abgebildet.

Die gemittelten Kurven sind bis einschließlich der Enddehnung ausgewertet worden. Die Bruchdehnungen sind aus den bereits in Abschnitt 6.5.2 beschriebenen Gründen (instabiler Zustand, unterschiedliche Beanspruchungen) nicht enthalten. Zu beachten ist zudem, dass die gemittelten Kurvenverläufe zu Beginn und am Ende der Belastung bei Versuchen mit relativ kleiner Bruchlastwechselzahl nur auf wenigen Stützstellen basieren.

Die Dehnungsentwicklungen bei Ober- bzw. Unterspannung und die Steifigkeitsentwicklungen wurden anhand der Ermüdungsversuche der Versuchsblöcke E2 und E4 analysiert, wobei die jeweils ausgewerteten Versuchsserien entsprechend des betrachteten Einflusses ausgewählt wurden (vgl. Abschnitt 6.5.5 – 6.5.7).

6.5.5 Einfluss der bezogenen Oberspannung

Wie bereits im Abschnitt 6.4 dargestellt, bewirkt eine Verkleinerung der bezogenen Oberspannung bei gleichbleibender bezogener Unterspannung eine Erhöhung der Bruchlastwechselzahlen. Nun soll die Auswirkung auf die Dehnungsentwicklung detailliert untersucht werden. Es werden hierfür Versuche mit verschiedenen bezogenen Oberspannungen bei gleicher Belastungsfrequenz bzw. Belastungsgeschwindigkeit und gleicher Wellenform vergleichend ausgewertet. Die untersuchten Oberspannungsniveaus waren zu $S_O = 0,95, 0,90$ und $0,80$ festgelegt. Die Unterspannung betrug wie bei allen Ermüdungsuntersuchungen $S_U = 0,05$. Bei den Versuchen mit sinusförmiger Wellenform wurde die Frequenz konstant gehalten. Dagegen blieb bei den Versuchen mit dreiecksförmiger Wellenform die Belastungsgeschwindigkeit konstant (vgl. Abschnitt 4.4.2).

Die Änderung der bezogenen Oberspannung bei gleichbleibender bezogener Unterspannung entspricht einer Änderung der Spannungsamplitude und bewirkt eine entsprechende Veränderung der absoluten „Höhenlage“ der Dehnungsentwicklung bei Oberspannung. Gleichzeitig ändern sich auch die Amplitude der Dehnung ε^A und die vor dem Start der zyklischen Bean-

spruchung aufgebrachte Spannungsmittellage mit der zugehörigen Dehnung ε^M . Bei der Auswertung des Einflusses der bezogenen Oberspannung auf die Dehnungsentwicklungen ist daher die Auswertung von Kenngrößen, die die „Höhenlage“ der Dehnungsentwicklung bei Oberspannung bzw. die den Abstand zur Mittellage beschreiben, trivial. Solche Kenngrößen werden daher bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Phaseneinteilung

Zunächst wurde die Auswirkung einer Verkleinerung der bezogenen Oberspannung auf die Phasenübergänge der Dehnungsentwicklungen untersucht. Diese sind in Tabelle 6.1 als Mittelwerte zusammengestellt. Es ist für beide Wellenformen zu sehen, dass sich kein einheitlicher Einfluss des Oberspannungswechsels auf das Auftreten der Phasenübergänge im Ermüdungsprozess ableiten lässt.

Charge	Bez. Oberspannung S_o [-]	Belastungsfrequenz f_p [Hz]	Belastungsgeschwindigkeit [kN·s ⁻¹]	Wellenform	Übergang Phase I/II N/N_f [-]	Übergang Phase II/III N/N_f [-]
B12	0,95	0,1	-	Sin	0,15	0,91
	0,90	0,1	-	Sin	0,12	0,92
	0,80	0,1	-	Sin	0,14	0,94
B14	0,95	1,0	-	Sin	0,11	0,93
	0,90	1,0	-	Sin	0,08	0,94
	0,80	1,0	-	Sin	0,08	0,94
B23	0,90	0,86	445,3	Dr	0,11	0,94
	0,80	0,98	445,3	Dr	0,11	0,93

Tabelle 6.1: Phasenübergänge: Einfluss der bezogenen Oberspannung

Dehnungsentwicklung

Die Ergebnisse der systematischen Auswertung des Einflusses eines Oberspannungswechsels auf die Dehnungsentwicklungen sind in Tabelle 6.2 enthalten. Dargestellt sind die Änderungen der jeweiligen Kenngrößen der Dehnungsentwicklung bei Verkleinerung der bezogenen Oberspannung. Die verschiedenen Zeilen enthalten die ausgewerteten Kenngrößen, wobei sich diese in solche bezogen auf die Dehnungsentwicklung bei Oberspannung (Zeile 1-8),

solche bezogen auf die Dehnungsentwicklung bei Unterspannung (Zeile 9-16) und weitere Kenngrößen (Zeile 17 und 18) aufteilen lassen. Die Spalten A und B enthalten die Angaben zu den Oberspannungswechseln bei der Prüffrequenz $f_p = 0,1$ Hz, die Spalten C und D diejenigen bei der Prüffrequenz $f_p = 1,0$ Hz. In Spalte E sind die Ergebnisse der Versuche mit dreiecksförmiger Wellenform enthalten, bei denen die Belastungsgeschwindigkeit konstant gehalten wurde und sich die Belastungsfrequenzen dementsprechend leicht unterscheiden. Die gemittelten Dehnungsentwicklungen sind in Anhang A-3.2.2, Abbildung A 3.1 – A 3.3 dargestellt.

Der Vergleich der Spalte E mit Spalte D zeigt, dass die qualitativen Auswirkungen des Oberspannungswechsels auf die Dehnungsentwicklungen bei sinusförmiger und dreiecksförmiger Wellenform sehr ähnlich sind. Daher werden die Auswirkungen des Oberspannungswechsels für beide Wellenformen hier gemeinsam betrachtet.

Zunächst ist festzustellen, dass die Unterdehnung ebenfalls relativ stark beeinflusst wird, obwohl nur die bezogene Oberspannung variiert und die bezogene Unterspannung konstant gehalten wird. Die Verkleinerung der bezogenen Oberspannung bewirkt eine Vergrößerung des Dehnungszuwachses in jeder Phase der Dehnungsentwicklung, sowohl bei Ober- als auch bei Unterspannung (Zeile 1-3 bzw. 9-11). Dementsprechend steigt auch der gesamte Dehnungszuwachs im Ermüdungsprozess an (Zeile 4/12). Das Ergebnis von [Holmen – 1979], der in der ersten Phase der Dehnungsentwicklung einen kleineren Dehnungszuwachs bei größerer bezogener Oberspannung feststellte, kann somit für den hochfesten Beton bestätigt werden.

Trotz der Vergrößerung des Dehnungszuwachses wird jedoch die Steigung der oberen und unteren Dehnungsentwicklung in jeder Phase verkleinert (Zeile 5-7 bzw. 13-15). Das heißt, der Dehnungszuwachs pro Lastwechsel verkleinert sich bei Verkleinerung der bezogenen Oberspannungen, wobei der Gesamtdehnungszuwachs vergrößert wird. In Zeile 18 ist zu sehen, dass die Differenz der Steigungen bei Ober- und Unterspannung in Phase II durch die Verkleinerung der bezogenen Oberspannung kleiner wird. Das heißt, die Steigung bei Oberspannung wird stärker durch den Oberspannungswechsel verkleinert als die Steigung bei Unterspannung. Insgesamt verlaufen die Dehnungsentwicklungen bei kleineren bezogenen Oberspannungen also stärker parallel.

Hervorzuheben ist, dass die Änderung der bezogenen Oberspannung prozentual betrachtet, verglichen mit den anderen Kenngrößen, kaum Auswirkungen auf die absolute obere Enddehnung (Zeile 8) und auf die absolute Bruchdehnung (Zeile 17) hat. Somit werden Ergebnisse von [Do et al. – 1993] bestätigt. Die Ergebnisse lassen insgesamt die Vermutung zu, dass sowohl die oberen Enddehnungen als auch die Bruchdehnungen unabhängig von der bezogenen Oberspannung sein könnten, was jedoch noch weitergehend zu überprüfen ist.

		A	B	C	D	E
Wechsel der bezogenen Oberspannung S_0 [-]		0,95 ↓ 0,90	0,90 ↓ 0,80	0,95 ↓ 0,90	0,90 ↓ 0,80	0,90 ↓ 0,80
Frequenz f_p [Hz]		0,1		1,0		0,86 /0,98
Wellenform		Sinus				Dreieck
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]		-	-	-	-	445,3
Charge		B12		B14		B23
1	Oberdehnung	Dehnungszuwachs Phase I $\Delta\varepsilon_O^I$	+	+	+	+
2		Dehnungszuwachs Phase II $\Delta\varepsilon_O^{II}$	+	+	+	+
3		Dehnungszuwachs Phase III $\Delta\varepsilon_O^{III}$	+	+	○	+
4		Dehnungszuwachs Gesamt $\Delta\varepsilon_O^{0,0-1,0}$	+	+	+	+
5		Steigung Phase I $\bar{\varepsilon}_{O,N}^I$	-	-	-	-
6		Steigung Phase II $\bar{\varepsilon}_{O,N}^{II}$	-	-	-	-
7		Steigung Phase III $\bar{\varepsilon}_{O,N}^{III}$	-	-	-	-
8		Enddehnung $\varepsilon_O^{1,0}$	○	○	○	○
9	Unterdehnung	Dehnungszuwachs Phase I $\Delta\varepsilon_U^I$	+	+	○	+
10		Dehnungszuwachs Phase II $\Delta\varepsilon_U^{II}$	+	+	+	+
11		Dehnungszuwachs Phase III $\Delta\varepsilon_U^{III}$	+	+	+	+
12		Dehnungszuwachs Gesamt $\Delta\varepsilon_U^{0,0-1,0}$	+	+	+	+
13		Steigung Phase I $\bar{\varepsilon}_{U,N}^I$	-	-	-	-
14		Steigung Phase II $\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	-	-	-	-
15		Steigung Phase III $\bar{\varepsilon}_{U,N}^{III}$	-	-	-	-
16		Enddehnung $\varepsilon_U^{1,0}$	+	+	+	+
17	Bruchdehnung ε^B	○	○	○	○	○
18	Diff. Steigungen Phase II $\Delta\bar{\varepsilon}_N^{II}$	-	-	-	-	-
+ / -: Zu- bzw. Abnahme von mehr als 5 % ○: Änderung um weniger als 5 %						

Tabelle 6.2: Dehnungsentwicklung: Einfluss der bezogenen Oberspannung

Steifigkeitsentwicklung

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Verkleinerung der bezogenen Oberspannung auf die Steifigkeitsentwicklungen untersucht. In Tabelle 6.3 sind die Veränderungen der Kenngrößen zusammengestellt.

		A	B	C	D	E
Wechsel der bezogenen Oberspannung S_0 [-]		0,95 ↓ 0,90	0,90 ↓ 0,80	0,95 ↓ 0,90	0,90 ↓ 0,80	0,90 ↓ 0,80
Frequenz f_p [Hz]		0,1		1,0		0,86 / 0,98
Wellenform		Sinus				Dreieck
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]		-	-	-	-	445,3
Charge		B12		B14		B23
1	Proz. Steifigkeitsverlust $\Delta E_S^{0,0-1,0}$	+	+	+	+	+
2	Gefälle Phase II $\bar{E}_{S,N}^{II}$	-	-	-	-	-
+ / -: Zu- bzw. Abnahme von mehr als 5 % ○: Änderung um weniger als 5 %						

Tabelle 6.3: Steifigkeitsentwicklung: Einfluss der bezogenen Oberspannung

Es ist zu sehen, dass sich der prozentuale Steifigkeitsverlust infolge der Verkleinerung der Oberspannung erhöht (Zeile 1). Dies bedeutet gleichzeitig, dass auch der prozentuale Endwert der Steifigkeit für kleinere Oberspannungen kleiner ist. Die Ergebnisse von [Holmen – 1979] können insofern bestätigt werden. Das Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase nimmt trotz steigendem Steifigkeitsverlust ab (Zeile 2). Das heißt, dass die Dehnungsdifferenz zwischen Oberdehnung und Unterdehnung bei kleineren bezogenen Oberspannungen weniger stark zunimmt (vgl. auch Tabelle 6.2).

Statistische Auswertung der Bruchdehnung und der oberen Enddehnung

Die zuvor dokumentierte Auswertung von Mittelwerten zeigt, dass die Bruchdehnung und die obere Enddehnung deutlich weniger durch die Verkleinerung der bezogenen Oberspannung beeinflusst werden als andere Kenngrößen der Dehnungsentwicklung. Um dieses Ergebnis zu überprüfen, wurden Signifikanztests in Form von F-Tests und t-Tests durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Anhang A-3.2.6, Tabelle A 3.36/A 3.37 zusammengestellt. Es ist zu sehen, dass die Mittelwerte der Bruchdehnungen bzw. die Mittelwerte der Enddehnungen, außer in einem Fall, jeweils nicht signifikant unterschiedlich sind. Die statistische Analyse stützt somit die Vermutung, dass der Wechsel der bezogenen Oberspannung kaum Einfluss auf die Bruchdehnungen und die oberen Enddehnungen haben könnte.

Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei kleinerer bezogener Oberspannung, und somit ausgehend von einem niedrigeren anfänglichen Dehnungsniveau, über den Ermüdungsprozess ein größerer Anteil an Dehnungen akkumuliert wird, bei einem gleichzeitig kleineren

Dehnungszuwachs pro Lastwechsel. Dabei ist der obere Dehnungszuwachs in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung größer als der untere Dehnungszuwachs. Die obere Enddehnung und die Bruchdehnung könnten unabhängig von der bezogenen Oberspannung sein und somit mögliche Grenzwerte der Ermüdungsdehnungen darstellen. Dies muss jedoch noch weitergehend geprüft werden. Auf die Phaseneinteilung hat die bezogene Oberspannung kaum Einfluss.

Das Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase, und somit die Degradation der Steifigkeit pro Lastwechsel, ist bei kleineren bezogenen Oberspannungen weniger stark ausgeprägt. Gleichzeitig ist der prozentuale Steifigkeitsverlust bis zum Versagen bei kleineren bezogenen Oberspannungen, und damit höheren Bruchlastwechselzahlen, größer. Der prozentuale Steifigkeitsverlust ist als ein belastungsunabhängiger Grenzwert im Sinne eines Bruchkriteriums somit nicht geeignet.

Würde von einem Grenzwert der Bruchdehnung ausgegangen, so muss durch die Verkleinerung der bezogenen Oberspannung im Ermüdungsprozess bis zum Erreichen der oberen Enddehnung bzw. Bruchdehnung ein größerer Dehnungsbetrag akkumuliert werden bei gleichzeitig kleinerem Dehnungszuwachs pro Lastwechsel. Somit wäre eine höhere Anzahl Lastwechsel bis zum Eintreten des Ermüdungsversagens erforderlich.

6.5.6 Einfluss der Belastungsfrequenz

Bei den ausgewerteten Versuchen wurden unterschiedliche Belastungsfrequenzen bei gleichen bezogenen Oberspannungen und Wellenformen untersucht. Die Erhöhung der Belastungsfrequenz bewirkt für den untersuchten Oberspannungsbereich eine Erhöhung der erreichten Bruchlastwechselzahlen (vgl. Abschnitt 6.4). Die Auswirkungen der Erhöhung der Frequenz auf die Dehnungsentwicklungen bei Ober- und Unterspannung sollen im Folgenden anhand der Versuche der Blöcke E2 und E4 mit Belastungsfrequenzen von rund $f_p = 0,1$ Hz, 1,0 Hz und 10,0 Hz detailliert dargestellt werden.

Phaseneinteilung

Tabelle 6.4 enthält eine Zusammenstellung der über die Versuche mit jeweils gleicher sinusförmiger Belastung gemittelten Phasenübergänge. Es ist zu sehen, dass der Übergang von Phase I zu Phase II bei höherer Frequenz etwas früher im Ermüdungsprozess erfolgt. Für das höhere Oberspannungsniveau $S_0 = 0,90$ scheint der Unterschied der Lokalisierung der Phasenübergänge im Ermüdungsprozess kleiner zu sein. Die betrachteten Frequenzwechsel zeigen auf den Übergang von Phase II zu Phase III keinen einheitlichen Einfluss.

In Tabelle 6.5 sind die gemittelten Phasenübergänge für die Versuche mit dreiecksförmiger Wellenform zusammengestellt. Anders als bei den Versuchen mit sinusförmiger Belastung zeigt sich hier weder bei dem Übergang von Phase I zu Phase II noch beim Übergang von Phase II zu Phase III ein über die Chargen einheitlicher Einfluss der Erhöhung der Belas-

tungsfrequenz. Es gibt somit keinen Hinweis darauf, dass bei dreiecksförmiger Wellenform, wie bei sinusförmiger Wellenform, der erste Phasenübergang bei höherer Frequenz früher im Ermüdungsprozess erfolgen könnte.

Charge	Bez. Oberspannung S_o [-]	Belastungsfrequenz f_p [Hz]	Belastungsgeschwindigkeit [kN·s ⁻¹]	Wellenform	Übergang Phase I/II N/N _f [-]	Übergang Phase II/III N/N _f [-]
B12	0,80	0,1	-	Sin	0,14	0,94
	0,80	1,0	-	Sin	0,10	0,94
B21	0,80	0,1	-	Sin	0,12	0,94
	0,80	1,0	-	Sin	0,09	0,92
B13	0,80	1,0	-	Sin	0,12	0,92
	0,80	10,0	-	Sin	0,08	0,90
B22	0,90	0,09	-	Sin	0,15	0,91
	0,90	0,89	-	Sin	0,14	0,93

Tabelle 6.4: Phasenübergänge: Einfluss der Belastungsfrequenz (Sinus)

Charge	Bez. Oberspannung S_o [-]	Belastungsfrequenz f_p [Hz]	Belastungsgeschwindigkeit [kN·s ⁻¹]	Wellenform	Übergang Phase I/II N/N _f [-]	Übergang Phase II/III N/N _f [-]
B21	0,80	0,1	44,53	Dr	0,11	0,94
	0,80	1,0	445,3	Dr	0,08	0,94
B22	0,90	0,09	44,53	Dr	0,11	0,92
	0,90	0,89	445,3	Dr	0,13	0,91
B23	0,80	0,98	445,3	Dr	0,11	0,93
	0,80	9,76	4453	Dr	0,05	0,94

Tabelle 6.5: Phasenübergänge: Einfluss der Belastungsfrequenz (Dreieck)

Werden die Ergebnisse für beide Wellenformen gemeinsam betrachtet, so ist festzustellen, dass der Wechsel der Belastungsfrequenz keine einheitlichen Einflüsse auf die Phasenübergänge hat. Die Phasen der Dehnungsentwicklung werden kaum bzw. nicht durch die Belastungsfrequenz beeinflusst.

Dehnungsentwicklung

Die Auswirkungen der Erhöhung der Belastungsfrequenz auf die Dehnungsentwicklung sind in Tabelle 6.6 bzw. Tabelle 6.7 zusammengestellt. Dargestellt ist die Veränderung der jeweiligen Kenngröße infolge einer Frequenzerhöhung um Faktor 10. Die Spalten beinhalten dabei jeweils unterschiedliche bezogene Oberspannungen und Chargen. Die gemittelten Dehnungsentwicklungen sind in Anhang A-3.2.3, Abbildung A 3.4 – A 3.6 dargestellt.

In Tabelle 6.6 ist für sinusförmige Belastungen zu sehen, dass die Differenz der oberen Anfangsdehnung zur Mittellage nicht einheitlich beeinflusst wird (Zeile 1). Die Anfangsdehnung bei Unterspannung wird weniger beeinflusst (Zeile 11). Die Erhöhung der Belastungsfrequenz führt zu einem verminderten Dehnungszuwachs in der ersten und zweiten Phase der Dehnungsentwicklung (Zeile 2/3 bzw. Zeile 12/13). In der dritten Phase zeigt sich, insgesamt betrachtet, eine Vergrößerung des Dehnungszuwachses (Zeile 4 bzw. Zeile 14). Der Gesamtdehnungszuwachs bei Unterspannung wird vermindert, bei Oberspannung jedoch nur tendenziell vermindert (Zeile 5 bzw. Zeile 15).

Die Erhöhung der Belastungsfrequenz führt zu einer Verkleinerung der Steigungen in den verschiedenen Phasen der Dehnungsentwicklung bei Ober- und Unterspannung. Infolge der Frequenzerhöhung verringert sich somit der Dehnungszuwachs pro Lastwechsel. Auch die Differenz der Steigungen bei Ober- und Unterspannung in der zweiten Phase verringert sich durch den Frequenzwechsel, d. h. die Dehnungsentwicklungen in der zweiten Phase verlaufen bei höherer Frequenz mit ähnlicheren Steigungen und die Amplitude der Dehnung ε^A verändert sich in der zweiten Phase weniger stark (Zeile 23).

Die oberen Enddehnungen (Zeile 9/10) werden prozentual betrachtet, außer bei der Charge B12, weniger durch den Frequenzwechsel beeinflusst. Dagegen zeigen die unteren Enddehnungen eine Verkleinerung der absoluten Werte (Zeile 19) und eine Vergrößerung der Differenz zur Mittellage (Zeile 20). Die Bruchdehnungen werden ebenfalls tendenziell wenig durch den jeweiligen Frequenzwechsel beeinflusst (Zeile 21/22).

In Analogie zum Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Dehnungsentwicklungen bei sinusförmiger Belastung soll im Folgenden der Einfluss auf die Dehnungsentwicklung bei dreiecksförmiger Belastung betrachtet werden. Die Auswirkungen auf die gewählten Kenngrößen der Dehnungsentwicklung sind in Tabelle 6.7 dargestellt.

		A	B	C	D	
Wechsel der Belastungsfrequenz f_p [Hz]		1,0 ↑ 0,1	1,0 ↑ 0,1	10,0 ↑ 1,0	0,89 ↑ 0,09	
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]		-	-	-	-	
Wellenform		Sinus				
Bezogene Oberspannung S_0 [-]		0,80	0,80	0,80	0,90	
Charge		B12	B21	B13	B22	
1	Oberdehnung	Diff. Anfangsdehnung $\Delta\varepsilon_O^{0,0;M}$	-	-	○	○
2		Dehnungszuwachs Phase I $\Delta\varepsilon_O^I$	-	-	-	-
3		Dehnungszuwachs Phase II $\Delta\varepsilon_O^{II}$	-	-	-	-
4		Dehnungszuwachs Phase III $\Delta\varepsilon_O^{III}$	+	+	+	○
5		Dehnungszuwachs Gesamt $\Delta\varepsilon_O^{0,0-1,0}$	-	○	○	-
6		Steigung Phase I $\bar{\varepsilon}_{O,N}^I$	-	-	-	-
7		Steigung Phase II $\bar{\varepsilon}_{O,N}^{II}$	-	-	-	-
8		Steigung Phase III $\bar{\varepsilon}_{O,N}^{III}$	-	-	-	-
9		Enddehnung $\varepsilon_O^{1,0}$	-	○	○	○
10		Diff. Enddehnung $\Delta\varepsilon_O^{1,0;M}$	-	○	○	-
11	Unterdehnung	Diff. Anfangsdehnung $\Delta\varepsilon_U^{0,0;M}$	-	○	○	○
12		Dehnungszuwachs Phase I $\Delta\varepsilon_U^I$	-	-	-	-
13		Dehnungszuwachs Phase II $\Delta\varepsilon_U^{II}$	-	-	-	-
14		Dehnungszuwachs Phase III $\Delta\varepsilon_U^{III}$	+	+	+	-
15		Dehnungszuwachs Gesamt $\Delta\varepsilon_U^{0,0-1,0}$	-	-	-	-
16		Steigung Phase I $\bar{\varepsilon}_{U,N}^I$	-	-	-	-
17		Steigung Phase II $\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	-	-	-	-
18		Steigung Phase III $\bar{\varepsilon}_{U,N}^{III}$	-	-	-	-
19		Enddehnung $\varepsilon_U^{1,0}$	-	-	○	-
20		Diff. Enddehnung $\Delta\varepsilon_U^{1,0;M}$	+	+	+	+
21	Bruchdehnung ε^B	-	○	○	○	
22	Diff. Bruchdehnung $\Delta\varepsilon^{B;M}$	-	○	○	-	
23	Diff. Steigungen Phase II $\Delta\bar{\varepsilon}_N^{II}$	-	-	-	-	
+ / -: Zu- bzw. Abnahme von mehr als 5 % ○: Änderung um weniger als 5 %						

Tabelle 6.6: Dehnungsentwicklung: Einfluss der Belastungsfrequenz (Sinus)

		A	B	C	
Wechsel der Belastungsfrequenz f_p [Hz]		1,0 ↑ 0,1	0,89 ↑ 0,09	9,76 ↑ 0,98	
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]		44,53/ 445,3	44,53/ 445,3	445,3/ 4453	
Wellenform		Dreieck			
Bezogene Oberspannung S_0 [-]		0,80	0,90	0,80	
Charge		B21	B22	B23	
1	Oberdehnung	Diff. Anfangsdehnung $\Delta\varepsilon_O^{0,0;M}$	○	○	-
2		Dehnungszuwachs Phase I $\Delta\varepsilon_O^I$	-	+	-
3		Dehnungszuwachs Phase II $\Delta\varepsilon_O^{II}$	○	-	○
4		Dehnungszuwachs Phase III $\Delta\varepsilon_O^{III}$	+	+	+
5		Dehnungszuwachs Gesamt $\Delta\varepsilon_O^{0,0-1,0}$	○	○	○
6		Steigung Phase I $\bar{\varepsilon}_{O,N}^I$	-	-	○
7		Steigung Phase II $\bar{\varepsilon}_{O,N}^{II}$	-	-	-
8		Steigung Phase III $\bar{\varepsilon}_{O,N}^{III}$	-	-	-
9		Enddehnung $\varepsilon_O^{1,0}$	○	○	○
10		Diff. Enddehnung $\Delta\varepsilon_O^{1,0;M}$	○	○	○
11	Unterdehnung	Diff. Anfangsdehnung $\Delta\varepsilon_U^{0,0;M}$	○	○	-
12		Dehnungszuwachs Phase I $\Delta\varepsilon_U^I$	-	-	-
13		Dehnungszuwachs Phase II $\Delta\varepsilon_U^{II}$	-	-	-
14		Dehnungszuwachs Phase III $\Delta\varepsilon_U^{III}$	+	○	+
15		Dehnungszuwachs Gesamt $\Delta\varepsilon_U^{0,0-1,0}$	-	-	-
16		Steigung Phase I $\bar{\varepsilon}_{U,N}^I$	-	-	-
17		Steigung Phase II $\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	-	-	-
18		Steigung Phase III $\bar{\varepsilon}_{U,N}^{III}$	-	-	-
19		Enddehnung $\varepsilon_U^{1,0}$	-	-	-
20		Diff. Enddehnung $\Delta\varepsilon_U^{1,0;M}$	+	+	+
21		Bruchdehnung ε^B	○	○	○
22		Diff. Bruchdehnung $\Delta\varepsilon^{B;M}$	○	○	○
23		Diff. Steigungen Phase II $\Delta\bar{\varepsilon}_N^{II}$	-	-	-
+ / -: Zu- bzw. Abnahme von mehr als 5 % ○: Änderung um weniger als 5 %					

Tabelle 6.7: Dehnungsentwicklung: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit (Dreieck)

Die Differenzen der oberen und unteren Anfangsdehnung zur Mittellage werden weniger deutlich beeinflusst (Zeile 1 und 11) als es aufgrund der Ergebnisse zu den Spannungs-Dehnungslinien bei monoton steigender Beanspruchung zu vermuten war (vgl. Abschnitt 5.3). Die absoluten Werte der Dehnungsdifferenzen in den Tabellen A 3.30 und A 3.31 im Anhang A-3.2.3 zeigen jedoch, dass höhere Belastungsfrequenzen zum überwiegenden Teil zu kleineren Dehnungsdifferenzen führen. Die geringere Ausprägung der Beeinflussung kann zum einen auf den Lastaufbringungsvorgang zurückgeführt werden, bei dem zunächst die Mittellast mit relativ langsamer Geschwindigkeit, und damit eine relativ höhere Dehnung, aufgebracht und anschließend die zyklische Belastung gestartet wurde. Andererseits sind die Ober- und Unterdehnungen in den ersten Lastwechseln auch durch die Abweichungen des Ist-Wertes der Kraft vom Soll-Wert beeinflusst (vgl. Abschnitt 6.3). Auch bei dreiecksförmiger Belastung kann somit der aus den Versuchen mit monoton steigender Beanspruchung bekannte Effekt kleinerer Dehnungen bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten nicht eindeutig nachvollzogen werden, obwohl der Geschwindigkeitsverlauf hier bis zum Erreichen der Maximal- bzw. Minimallast linear ist.

Auf den Dehnungszuwachs bei Oberspannung in der ersten und zweiten Phase der Dehnungsentwicklung sind keine einheitlichen Auswirkungen erkennbar (Zeile 2/3). Dagegen vermindert sich der Dehnungszuwachs bei Unterspannung in den ersten beiden Phasen (Zeile 12/13). Der Dehnungszuwachs in der dritten Phase wird durch die erhöhte Belastungsfrequenz vergrößert (Zeile 4/14). Es ist auffällig, dass der Gesamtdehnungszuwachs der oberen Dehnung kaum beeinflusst wird (Zeile 5). Der Gesamtzuwachs der Unterdehnung ist dagegen bei höherer Belastungsfrequenz kleiner (Zeile 15).

Die Steigungen der oberen und unteren Dehnungsentwicklung in den drei Phasen werden verkleinert (Zeile 6-8 bzw. Zeile 16-18). Eine erhöhte Belastungsfrequenz führt somit auch bei dreiecksförmiger Belastung insgesamt zu einem verkleinerten Dehnungszuwachs pro Lastwechsel. Die Differenz der oberen und unteren Steigung wird ebenfalls verkleinert. Das heißt, die obere und untere Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase verlaufen bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten mit ähnlicheren Steigungen (Zeile 23).

Die oberen Enddehnungen werden prozentual betrachtet kaum beeinflusst (Zeile 9/10). Dagegen ist für die untere Enddehnung eine Verkleinerung (Zeile 19) und für die Differenz der unteren Enddehnung zur Mittellage eine Vergrößerung erkennbar (Zeile 20). Die Bruchdehnungen werden auch bei den Versuchen mit dreiecksförmiger Wellenform weniger beeinflusst (Zeile 21/22). Es ist weitergehend zu prüfen, ob die oberen Enddehnungen und Bruchdehnungen als Grenzwerte der Dehnungsentwicklungen angesehen werden können.

Werden die Auswertungen für die beiden Wellenformen verglichen (Tabelle 6.6 und Tabelle 6.7), so sind die größten Unterschiede in den Dehnungszuwächsen bei Oberspannung in Phase I und Phase II zu erkennen. Alle anderen Kenngrößen werden bei beiden Wellenformen durch die Erhöhung der Belastungsfrequenz in ähnlicher Art beeinflusst. Insgesamt zeigen die ge-

mittelten Dehnungsentwicklungen, dass die Dehnungen bei Ober- und Unterspannung bei kleineren Belastungsfrequenzen größer sind (vgl. Anhang A-3.2.3), wie bereits auch von [Awad / Hilsdorf – 1971] berichtet.

Steifigkeitsentwicklung

In Tabelle 6.8 und Tabelle 6.9 sind die Veränderungen des prozentualen Steifigkeitsverlusts und des Gefälles der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase zusammengestellt.

		A	B	C	D
Wechsel der Belastungsfrequenz f_p [Hz]		1,0 ↑ 0,1	1,0 ↑ 0,1	10,0 ↑ 1,0	0,89 ↑ 0,09
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]		-	-	-	-
Wellenform		Sinus			
Bezogene Oberspannung S_O [-]		0,80	0,80	0,80	0,90
Charge		B12	B21	B13	B22
1	Proz. Steifigkeitsverlust $\Delta E_S^{0,0-1,0}$	-	+	+	-
2	Gefälle Phase II $\bar{E}_{S,N}^{II}$	-	-	-	-
+ / -: Zu- bzw. Abnahme von mehr als 5 % ○: Änderung um weniger als 5 %					

Tabelle 6.8: Steifigkeitsentwicklung: Einfluss der Belastungsfrequenz (Sinus)

		A	B	C
Wechsel der Belastungsfrequenz f_p [Hz]		1,0 ↑ 0,1	0,89 ↑ 0,09	9,76 ↑ 0,98
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]		44,53/ 445,3	44,53/ 445,3	445,3/ 4453
Wellenform		Dreieck		
Bezogene Oberspannung S_O [-]		0,80	0,90	0,80
Charge		B21	B22	B23
1	Proz. Steifigkeitsverlust $\Delta E_S^{0,0-1,0}$	+	+	+
2	Gefälle Phase II $\bar{E}_{S,N}^{II}$	-	-	-
+ / -: Zu- bzw. Abnahme von mehr als 5 % ○: Änderung um weniger als 5 %				

Tabelle 6.9: Steifigkeitsentwicklung: Einfluss der Belastungsfrequenz (Dreieck)

Insgesamt betrachtet zeigt sich, dass der Steifigkeitsverlust im Ermüdungsprozess infolge der Frequenzerhöhung tendenziell stärker ausgeprägt ist (Zeilen 1). Gleichzeitig verkleinert sich jedoch das Gefälle des Sekantenmoduls in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung (Zeilen 2). Dieses deutet auf eine geringere Degradation der Steifigkeit pro Lastwechsel infolge höherer Belastungsfrequenzen hin.

Statistische Auswertung der Bruchdehnung und der oberen Enddehnung

Die prozentuale Auswertung der Änderung der Mittelwerte der Bruchdehnungen und der oberen Enddehnung bei verschiedenen Belastungsfrequenzen lässt die Vermutung zu, dass die Bruchdehnungen und die oberen Enddehnungen nicht von der Belastungsfrequenz beeinflusst werden. Zur Überprüfung dieser Vermutung wurden die Varianzen und Mittelwerte mittels kombinierter F-Tests und t-Tests auf Homogenität untersucht. Für die Enddehnungen und für die Bruchdehnungen wurden außer in zwei Fällen keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Die Ergebnisse der statistischen Analyse sind in Anhang A-3.2.6, Tabelle A 3.36/A 3.37 zusammengestellt. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Bruchdehnung und die obere Enddehnung kaum von der Belastungsfrequenz beeinflusst werden.

Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Erhöhung der Belastungsfrequenz einen verminderten bzw. uneinheitlichen Zuwachs der Ober- und Unterdehnung in der ersten und zweiten Phase der Dehnungsentwicklung sowie einen verstärkten Zuwachs in der dritten Phase der Dehnungsentwicklung hervorruft. Der untere Gesamtdehnungszuwachs wird verkleinert, während der obere Gesamtdehnungszuwachs tendenziell gleich bleibt. Die Bruchdehnung und die obere Enddehnung werden kaum beeinflusst. Dagegen wird der obere und untere Dehnungszuwachs pro Lastwechsel in den Phasen der Dehnungsentwicklung durch höhere Belastungsfrequenzen verkleinert. Es konnte keine einheitliche Beeinflussung der Phaseneinteilung infolge einer Erhöhung der Belastungsfrequenz festgestellt werden.

Das Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung ist für höhere Belastungsfrequenzen kleiner, d. h. die Steifigkeitsdegradation pro Lastwechsel ist anscheinend bei höheren Belastungsfrequenzen kleiner. Dieses ist noch weitergehend zu prüfen (vgl. Abschnitt 10.4.4). Der prozentuale Steifigkeitsverlust am Ende der Belastung ist jedoch gleichzeitig tendenziell höher. Der prozentuale Steifigkeitsverlust am Ende des Ermüdungsprozesses scheint durch die Belastungsfrequenz beeinflusst zu sein und eignet sich daher nicht als Grenzwert im Sinne eines Bruchkriteriums. Es ist noch weitergehend zu prüfen, ob die Bruchdehnung und die obere Enddehnung als Grenzwerte verwendet werden können.

Ausgehend von einem ungefähr gleichen relativen anfänglichen Dehnungsniveau bei Oberspannung wird bei höherer Belastungsfrequenz bzw. -geschwindigkeit ein in etwa gleicher bis

kleinerer Dehnungszuwachs bei Oberspannung bei gleichzeitig kleinerem Dehnungszuwachs pro Lastwechsel aufsummiert.

Wird der gleiche Gesamtdehnungszuwachs bis zum letzten Lastwechsel mit dem Erreichen einer ähnlich großen Enddehnung bzw. Bruchdehnung als Bruchkriterium sowie einem kleineren Dehnungszuwachs pro Lastwechsel in Verbindung gebracht, so ist dementsprechend bei höherer Belastungsfrequenz eine höhere Anzahl Lastwechsel bis zum Versagen erforderlich.

6.5.7 Einfluss der Wellenform

Anhand der experimentellen Untersuchungen des hochfesten Betons wurde festgestellt, dass der Wechsel der Wellenform vom Sinus zum Dreieck zu höheren Bruchlastwechselzahlen führt (vgl. Abschnitt 6.5.7). Durch die vergleichende Auswertung der Sinus- und Dreieckversuche soll nun der Einfluss der Wellenform auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung ermittelt werden.

Verwendet werden bei dieser Auswertung die Versuche aus Versuchsblock E4. Die verglichenen Versuche weisen als gemeinsame Belastungsparameter das gleiche Beanspruchungsniveau und die gleiche Belastungsfrequenz auf. Betrachtet wird jeweils die Auswirkung der Änderung der Wellenform vom Sinus zum Dreieck, also in Richtung höherer Bruchlastwechselzahlen.

Phaseneinteilung

Die über die Einzelversuche gleicher Belastungen gemittelten Werte der Phasenübergänge sind in Tabelle 6.10 zusammengestellt. Es ist zu sehen, dass der erste Phasenübergang zwischen Phase I und Phase II durch den Wechsel der Wellenform vom Sinus zum Dreieck etwas früher im Ermüdungsprozess auftritt. Die Unterschiede sind jedoch sehr klein. Hinsichtlich des zweiten Phasenübergangs zeigen die Auswertungen keinen einheitlichen Trend.

Charge	Bez. Ober-spannung S_o [-]	Frequenz f_p [Hz]	Belastungsgeschwindigkeit [kN·s ⁻¹]	Wellenform	Übergang Phase I/II N/N_f [-]	Übergang Phase II/III N/N_f [-]
B21	0,80	0,1	-	Sin	0,12	0,94
	0,80	0,1	44,53	Dr	0,11	0,94
B21	0,80	1,0	-	Sin	0,09	0,92
	0,80	1,0	445,3	Dr	0,08	0,94
B22	0,90	0,09	-	Sin	0,15	0,91
	0,90	0,09	44,53	Dr	0,11	0,92
B22	0,90	0,89	-	Sin	0,14	0,93
	0,90	0,89	445,3	Dr	0,13	0,91

Tabelle 6.10: Phasenübergänge: Einfluss der Wellenform

Dehnungsentwicklung

Die Ergebnisse der systematischen Auswertung des Einflusses der Wellenform auf die Dehnungsentwicklungen sind in Tabelle 6.11 enthalten. Jede Spalte beinhaltet dabei die Auswirkungen eines Wellenformwechsels bei gleich bleibender Oberspannung und Frequenz. In Anhang A-3.2.4, Abbildung A 3.7 und A 3.8 sind die gemittelten Dehnungsentwicklungen dargestellt.

Anhand von Tabelle 6.11 ist zu sehen, dass die Differenzen der oberen und unteren Anfangsdehnungen jeweils wenig durch den Wechsel der Wellenform beeinflusst werden (Zeile 1/11). Werden die absoluten Veränderungen betrachtet, so zeigt sich, dass die Differenzen der Anfangsdehnungen zur Mittellage bei dreiecksförmiger Belastung tendenziell etwas kleiner sind (vgl. Tabelle A 3.34). Die Unterschiede sind jedoch sehr gering. Der obere Dehnungszuwachs in allen Phasen sowie der Gesamtdehnungszuwachs steigen dagegen infolge des Wellenformwechsels an (Zeile 2-5). Der Dehnungszuwachs bei Unterspannung in den verschiedenen Phasen wird durch den Wechsel der Wellenform bei verschiedenen Oberspannungen und Frequenzen uneinheitlich beeinflusst (Zeile 12-15).

			A	B	C	D
Wechsel der Wellenform			Sinus → Dreieck			
Belastungsfrequenz f_P [-]			0,1	1,0	0,09	0,89
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]			44,53	445,3	44,53	445,3
Bezogene Oberspannung S_O [-]			0,80	0,80	0,90	0,90
Charge			B21	B21	B22	B22
1	Oberdehnung	Diff. Anfangsdehnung $\Delta\varepsilon_O^{0,0;M}$	-	○	○	○
2		Dehnungszuwachs Phase I $\Delta\varepsilon_O^I$	+	+	○	+
3		Dehnungszuwachs Phase II $\Delta\varepsilon_O^{II}$	○	+	+	+
4		Dehnungszuwachs Phase III $\Delta\varepsilon_O^{III}$	+	○	+	+
5		Dehnungszuwachs Gesamt $\Delta\varepsilon_O^{0,0-1,0}$	+	○	+	+
6		Steigung Phase I $\bar{\varepsilon}_{O,N}^I$	-	-	-	-
7		Steigung Phase II $\bar{\varepsilon}_{O,N}^{II}$	-	-	-	-
8		Steigung Phase III $\bar{\varepsilon}_{O,N}^{III}$	-	-	-	-
9		Enddehnung $\varepsilon_O^{1,0}$	○	○	○	○
10		Diff. Enddehnung $\Delta\varepsilon_O^{1,0;M}$	○	○	○	+
11	Unterdehnung	Diff. Anfangsdehnung $\Delta\varepsilon_U^{0,0;M}$	○	○	○	-
12		Dehnungszuwachs Phase I $\Delta\varepsilon_U^I$	+	○	-	○
13		Dehnungszuwachs Phase II $\Delta\varepsilon_U^{II}$	+	○	+	○
14		Dehnungszuwachs Phase III $\Delta\varepsilon_U^{III}$	+	○	+	+
15		Dehnungszuwachs Gesamt $\Delta\varepsilon_U^{0,0-1,0}$	+	○	+	+
16		Steigung Phase I $\bar{\varepsilon}_{U,N}^I$	-	-	-	-
17		Steigung Phase II $\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	-	-	-	-
18		Steigung Phase III $\bar{\varepsilon}_{U,N}^{III}$	-	-	-	-
19		Enddehnung $\varepsilon_U^{1,0}$	+	+	+	+
20		Diff. Enddehnung $\Delta\varepsilon_U^{1,0;M}$	-	○	-	-
21		Bruchdehnung ε^B	○	○	○	○
22		Diff. Bruchdehnung $\Delta\varepsilon^{B;M}$	○	○	○	○
23		Diff. Steigungen Phase II $\Delta\bar{\varepsilon}_N^{II}$	-	-	-	-
+ / -: Zu- bzw. Abnahme von mehr als 5 % ○: Änderung um weniger als 5 %						

Tabelle 6.11: Dehnungsentwicklung: Einfluss der Wellenform

Die Steigungen der oberen und unteren Dehnungsentwicklung nehmen jeweils ab (Zeile 6-8 bzw. Zeile 16-18). Auch die Differenz der oberen und unteren Steigung in der zweiten Phase

wird verkleinert (Zeile 23). Der Dehnungszuwachs pro Lastwechsel sowie die Änderung der Amplitude der Dehnung ε^A in der zweiten Phase sind somit bei dreiecksförmiger Belastung kleiner als bei sinusförmiger Wellenform. Die oberen Enddehnungen werden, anders als die unteren Enddehnungen (Zeile 19/20), nur wenig durch den Wellenformwechsel beeinflusst (Zeile 9/10). Auch die Bruchdehnungen werden kaum beeinflusst (Zeile 21/22).

Steifigkeitsentwicklung

Tabelle 6.12 zeigt die Auswirkungen des Wechsels der Wellenform auf die Kenngrößen der Steifigkeitsentwicklung. Es ist zu sehen, dass sich der prozentuale Steifigkeitsverlust trotz (immer) vergrößerter Bruchlastwechselzahl teilweise erhöht und teilweise verringert (Zeile 1). Das Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase nimmt jedoch immer ab (Zeile 2).

		A	B	C	D
Wechsel der Wellenform		Sinus → Dreieck			
Belastungsfrequenz f_p [-]		0,1	1,0	0,09	0,89
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]		44,53	445,3	44,53	445,3
Bezogene Oberspannung S_O [-]		0,80	0,80	0,90	0,90
Charge		B21	B21	B22	B22
1	Proz. Steifigkeitsverlust $\Delta E_S^{0,0-1,0}$	+	○	-	○
2	Gefälle Phase II $\bar{E}_{S,N}^{II}$	-	-	-	-
+ / -: Zu- bzw. Abnahme von mehr als 5 % ○: Änderung um weniger als 5 %					

Tabelle 6.12: Steifigkeitsentwicklung: Einfluss der Wellenform

Statistische Auswertung der Bruchdehnung und der oberen Enddehnung

Auch hinsichtlich des Wechsels der Wellenform zeigte die prozentuale Auswertung der Mittelwerte der Bruchdehnungen und der Enddehnungen, dass diese nur sehr wenig durch die Belastungsfrequenz beeinflusst werden. Im Rahmen einer ergänzenden statistischen Auswertung wurde dieses Ergebnis überprüft. Es wurden F-Tests und t-Tests durchgeführt, um die Homogenität der Varianzen und der Mittelwerte zu überprüfen. Die Ergebnisse sind in Anhang A-3.2.6, Tabelle A 3.36/A 3.37 tabellarisch zusammengestellt. Es konnten sowohl für die Bruchdehnungen als auch für die oberen Enddehnungen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Somit ist dies ein weiterer Hinweis darauf, dass der Wechsel der Wellenform kaum Einfluss auf die Bruchdehnung und die obere Enddehnung hat.

Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Wechsel der Wellenform vom Sinus zum Dreieck eine Erhöhung des oberen und unteren Gesamtdehnungszuwachses bewirkt. Gleichzeitig wird der obere und untere Dehnungszuwachs pro Lastwechsel in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung sowie die Differenz der oberen und unteren Steigungen verkleinert. Die obere Enddehnung sowie die Bruchdehnung wurden kaum beeinflusst. Sie könnten daher Grenzwerte der Ermüdungsdehnung sein. Dies ist weitergehend zu prüfen.

Die Steifigkeitsabnahme pro Lastwechsel in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung verringert sich durch den Wechsel der Wellenform vom Sinus zum Dreieck. Das heißt, bei dreiecksförmiger Beanspruchung ist die Steifigkeitsdegradation pro Lastwechsel möglicherweise kleiner als bei sinusförmiger Belastung. Die Auswertung des prozentualen Steifigkeitsverlusts zeigt keine einheitliche Beeinflussung durch die Wellenform.

Durch den Wechsel der Wellenform vom Sinus zum Dreieck wird, ausgehend von einer tendenziell etwas kleineren Anfangsdehnung, im Ermüdungsprozess bis zum Versagen etwas mehr Dehnung bei Oberspannung akkumuliert, bei gleichzeitig kleinerem Dehnungszuwachs pro Lastwechsel. Bis zum Eintreten des Versagens sind somit mehr Lastwechsel erforderlich. Der Einfluss des Wechsels der Wellenform ähnelt qualitativ dem Einfluss der bezogenen Oberspannung auf die Dehnungsentwicklung (vgl. Abschnitt 6.5.5). Der Einfluss auf den Dehnungszuwachs in den einzelnen Phasen sowie auf den Gesamtdehnungszuwachs ist jedoch beim Wechsel der Oberspannung größer.

6.5.8 Systematische Zusammenhänge

Nachdem in den vorherigen Abschnitten die Veränderung der Kenngrößen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen infolge der einzelnen Belastungsparameter im Detail analysiert wurden, folgt nun eine den Chargen übergeordnete Betrachtung systematischer Zusammenhänge zwischen ausgewählten Kenngrößen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklung und den Bruchlastwechselzahlen bzw. Belastungsdauern bis zum Versagen. Dabei sollen insbesondere auch die in Abschnitt 3.2 aufgeführten Fragen beantwortet werden.

Für einheitlich beeinflusste Kenngrößen, wie die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und das Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase, wird geprüft, inwiefern Zusammenhänge zu den Bruchlastwechselzahlen oder zu den Belastungsdauern abgeleitet werden können. Für kaum beeinflusste Kenngrößen, wie die Bruchdehnung und die obere Enddehnung, wird der Grenzwertcharakter in der belastungsübergeordneten Betrachtung weitergehend überprüft. Darüber hinaus soll ausgewertet werden, ob für verschiedene zyklische Beanspruchungen ähnliche Dehnungen und/oder Steifigkeiten an den Phasenübergängen vorliegen und ob anhand dieser Dehnungen und Steifigkeiten Hinweise auf ähnliche Gefügestände bzw. Mikrorisszustände abgeleitet werden können.

Die im Folgenden betrachteten Kenngrößen werden sowohl über die Lastwechselzahlen als auch über die Belastungsdauern ausgewertet, um Hinweise darauf zu finden, ob sie eher durch einen zeitlichen Effekt oder durch einen zyklischen Effekt beeinflusst werden.

Dehnungen an den Phasenübergängen

Ergänzend zu den vorherigen Abschnitten 6.5.5 bis 6.5.7 sollen nun die Dehnungen bei Ober- und Unterspannung an den Phasenübergängen betrachtet werden. Bei der Bewertung der Dehnungen an den Phasenübergängen ist zu berücksichtigen, dass die Anzahl der Lastwechsel bzw. die Belastungsdauer bis zum Erreichen der Phasenübergänge für die jeweilige zyklische Belastung unterschiedlich ist. Die Phasenübergänge markieren Änderungen des Dehnungsverhaltens des Betons bzw. Änderungen der Mikrorissentstehung und Mikrorissausbreitung im Beton (vgl. z. B. [Klausen – 1978]). Insofern ist es von Interesse, ob an den Phasenübergängen ähnlich große Dehnungen vorhanden sind, die Hinweise auf ähnliche Gefügestände bzw. Mikrorisszustände zu diesen „Zeitpunkten“ des Ermüdungsprozesses liefern könnten. Die Betrachtung erfolgt erneut für solche Änderungen des jeweiligen Belastungsparameters, die zu höheren Bruchlastwechselzahlen führen.

Zunächst werden die Dehnungen bei Oberspannung betrachtet. Unterschiedliche bezogene Oberspannungen führen dabei unmittelbar zu unterschiedlich großen Oberdehnungen. Die Oberdehnungen beim Übergang von Phase I zu Phase II $\varepsilon_o^{I/II}$ sind als Mittelwerte über der logarithmierten Lastwechselzahl am jeweiligen Phasenübergang in Abbildung 6.21 und die Dehnungen beim Übergang von Phase II zu Phase III $\varepsilon_o^{II/III}$ in Abbildung 6.22 dargestellt. Beim Phasenübergang I/II ist zu sehen, dass die Oberdehnungen $\varepsilon_o^{I/II}$ für niedrigere bezogene Oberspannungen kleiner sind. Gleichzeitig führen höhere Frequenzen ebenfalls zu kleineren Dehnungen. Zwischen den Wellenformen sind für beide Beanspruchungsniveaus nur kleine Unterschiede der Dehnungen erkennbar. Beim Oberspannungsniveau $S_o = 0,90$ zeigen sich zu diesem „Zeitpunkt“ im Ermüdungsprozess noch kaum Einflüsse aus Belastungsfrequenz und Wellenform auf die Dehnung (Charge B22).

Im weiteren Verlauf der Ermüdungsbeanspruchung bis zum Übergang zwischen Phase II und III kommt es zur Angleichung der Dehnungen bei verschiedenen Oberspannungsniveaus. Diese Angleichung steht im Zusammenhang mit dem in Abschnitt 6.5.5 beschriebenen erhöhten Dehnungszuwachs bei kleineren Oberspannungsniveaus.

Bei Ermüdungsbeanspruchungen mit verschiedenen Belastungsfrequenzen sind die Dehnungsunterschiede beim Übergang von Phase II zu Phase III größer als beim vorherigen Phasenübergang. Bei höheren Belastungsfrequenzen wird der Übergang von Phase II zu Phase III bei teilweise deutlich kleineren Dehnungen erreicht. Auch die Versuche mit dreiecksförmiger Belastung zeigen nun größere Dehnungen als die Versuche bei sinusförmiger Belastung. Der Vergleich von Abbildung 6.22 mit Abbildung A 3.9 in Anhang A-3.2.5 zeigt, dass die Oberdehnungen einen stärkeren Bezug zur Lastwechselzahl als zur Belastungsdauer haben.

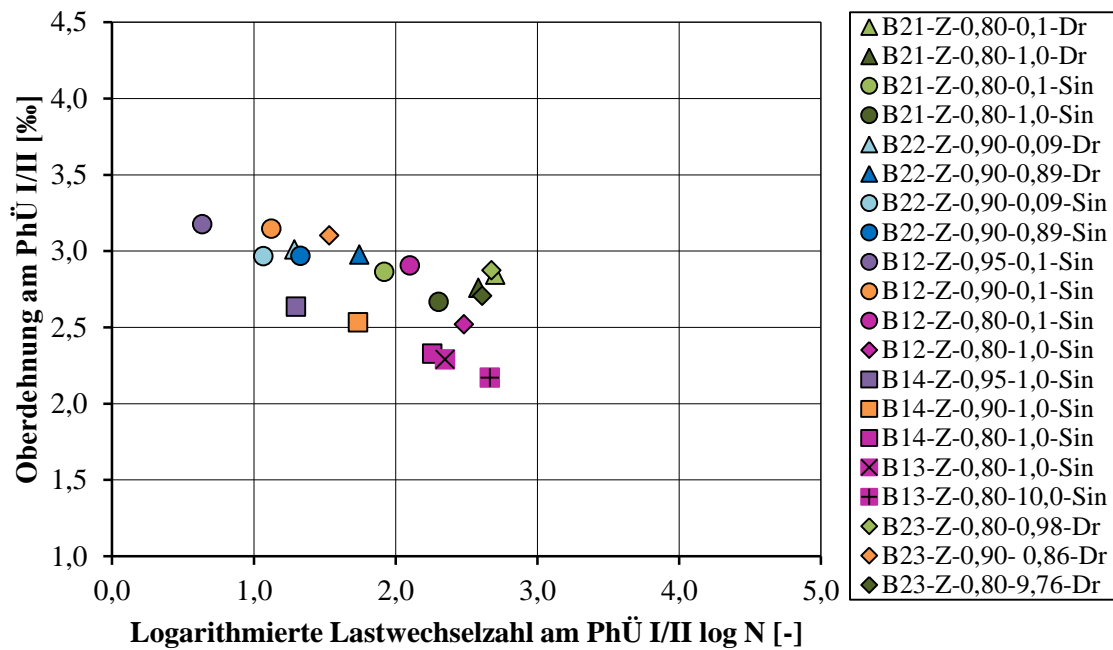


Abbildung 6.21: Oberdehnung am Phasenübergang I/II dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang I/II (Mittelwerte)

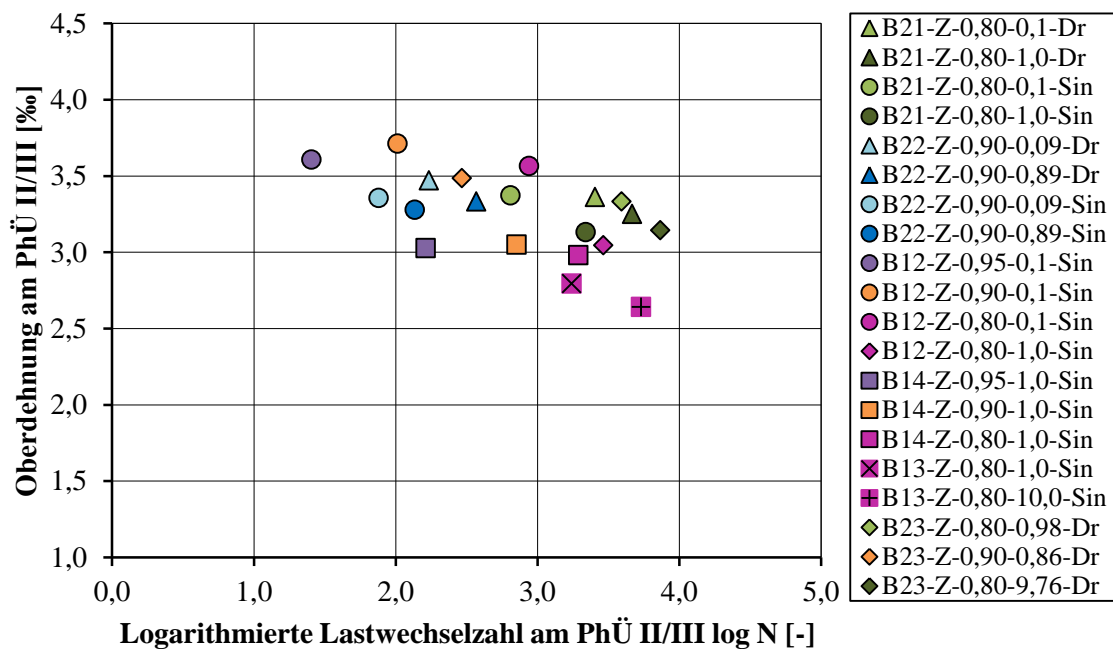


Abbildung 6.22: Oberdehnung am Phasenübergang II/III dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang II/III (Mittelwerte)

Die Dehnungen bei Unterspannung an den Phasenübergängen I/II $\epsilon_U^{I/II}$ bzw. II/III $\epsilon_U^{II/III}$ sind über der logarithmierten Lastwechselzahl am jeweiligen Phasenübergang in Abbildung 6.23 bzw. Abbildung 6.24 dargestellt. Anders als bei den Dehnungen bei Oberspannung ist das zu diesen Dehnungen gehörende Beanspruchungsniveau $S_U = 0,05$ auch bei unterschiedlichen

bezogenen Oberspannungen gleich. Beim Phasenübergang I/II ist zu sehen, dass niedrigere Oberspannungsniveaus zu gleichen bis größeren Unterdehnungen $\varepsilon_U^{I/II}$ führen. Höhere Belastungsfrequenzen führen zu kleineren Dehnungen. Infolge des Wechsels der Wellenform vom Sinus zum Dreieck ergeben sich dagegen größere Dehnungen. Für das Beanspruchungsniveau $S_0 = 0,90$ sind die Einflüsse aus der Belastungsfrequenz und Wellenform weniger ausgeprägt als für $S_0 = 0,80$.

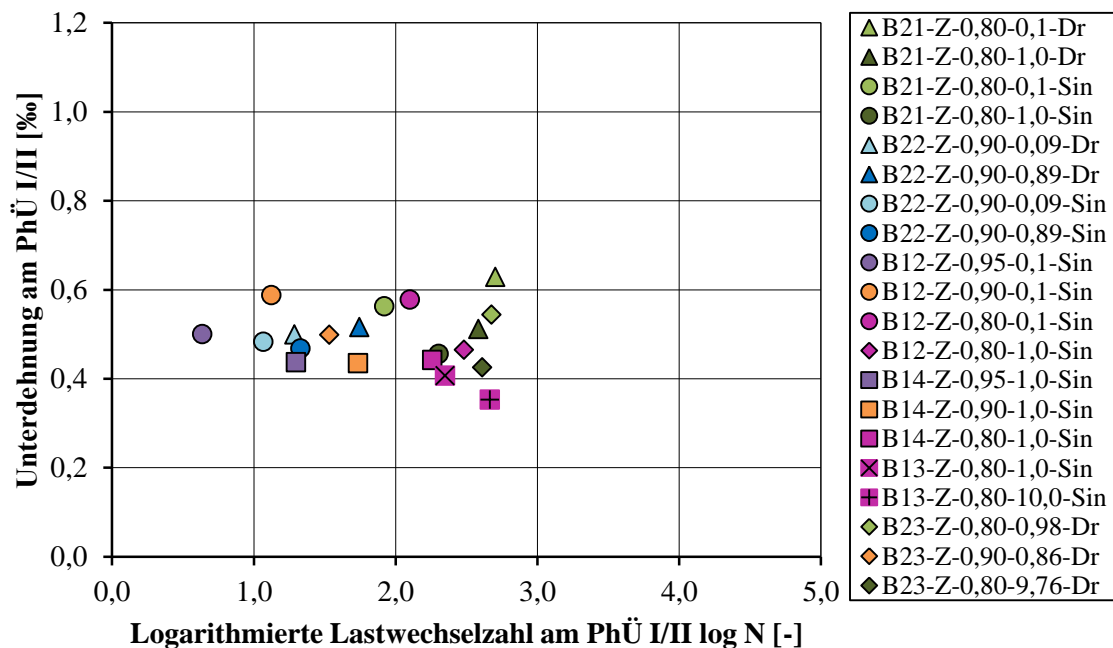


Abbildung 6.23: Unterdehnung am Phasenübergang I/II dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang I/II (Mittelwerte)

Beim Phasenübergang II/III sind deutliche Unterschiede der Dehnungen $\varepsilon_U^{II/III}$ bei verschiedenen Oberspannungsniveaus zu erkennen (Abbildung 6.24). Niedrigere bezogene Oberspannungen führen zu deutlich größeren Unterdehnungen obwohl das Unterspannungsniveau gleich ist. Im Gegensatz zum ersten Übergang sind die Unterdehnungen für höhere Belastungsfrequenzen nun deutlich kleiner. Die Versuche mit dreiecksförmiger Belastung zeigen ebenfalls größere Dehnungen als die bei sinusförmiger Belastung. Für das Oberspannungsniveau $S_0 = 0,90$ (Charge B22) sind die zuvor beschriebenen Einflüsse aus Belastungsfrequenz und Wellenform zu diesem „Zeitpunkt“ ebenfalls deutlich erkennbar. Die deutlichere Ausprägung der Beeinflussung der Ober- bzw. Unterdehnung am Phasenübergang II/III gegenüber der Beeinflussung an Übergang I/II ist auf den längeren vorangegangenen Ermüdungsprozess zurückzuführen. Der Vergleich von Abbildung 6.24 mit Abbildung A 3.10 zeigt, dass die Unterdehnung, anders als die Oberdehnung, einen stärkeren Bezug zur Belastungsdauer als zur Lastwechselzahl hat.

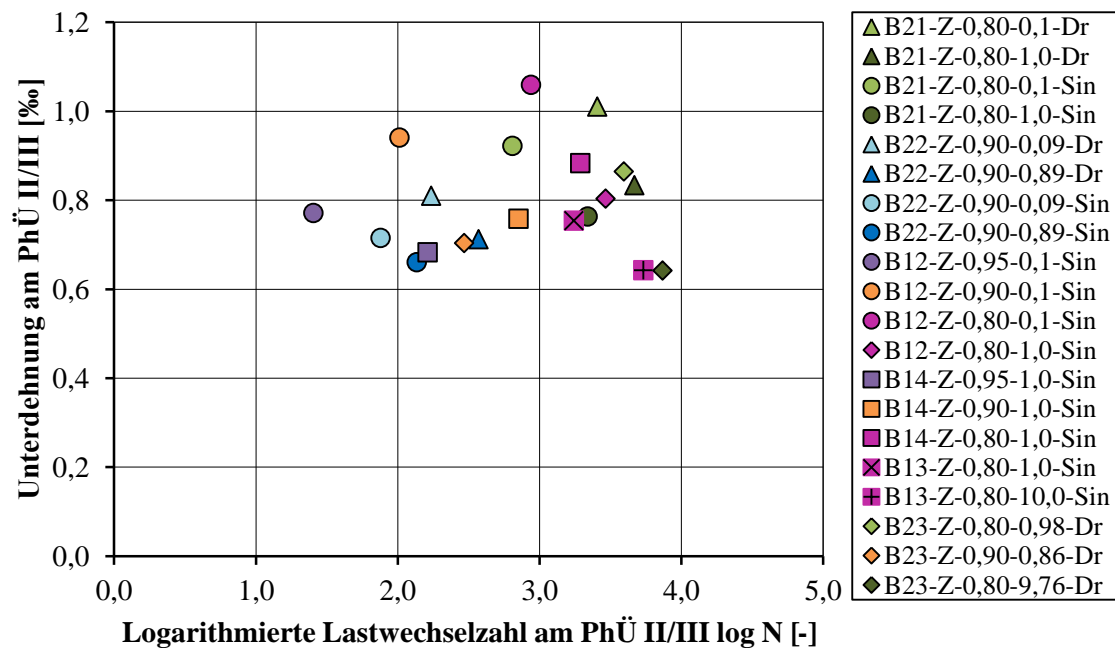


Abbildung 6.24: Unterdehnung am Phasenübergang II/III dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang II/III (Mittelwerte)

Interessant ist insbesondere der Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Dehnungen an den Phasenübergängen. Zu erwarten wäre, dass eine höhere Anzahl an Lastwechseln bis zum Erreichen der Phasenübergänge zu größeren Ober- und Unterdehnungen führt. Es ergibt sich infolge der Erhöhung der Belastungsfrequenz zwar eine Erhöhung der Lastwechselzahl an den Phasenübergängen (und der Bruchlastwechselzahl), aber gleichzeitig sind die Dehnungen an den Phasenübergängen kleiner. In Anhang A-3.2.5 Abbildung A 3.9 bzw. A 3.10 ist zu sehen, dass sich für höhere Belastungsfrequenzen kürzere Belastungsdauern bis zum Phasenübergang ergeben. Trotz einer höheren Anzahl an Lastwechseln werden also bei höheren Belastungsfrequenzen aufgrund der kürzeren Dauer der einzelnen Lastwechsel kleinere Dehnungen an den Phasenübergängen erreicht. Dieses muss im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten im Lastwechsel stehen.

Die Differenzen zwischen der Oberdehnung und der Unterdehnung an den Phasenübergängen sind in Abbildung 6.25 bzw. Abbildung 6.26 über der logarithmierten Lastwechselzahl dargestellt. Zu sehen ist, dass die Dehnungsdifferenzen für niedrigere bezogene Oberspannungen erwartungsgemäß jeweils kleiner sind. Die Erhöhung der Belastungsfrequenz führt insbesondere beim Phasenübergang II/III zu niedrigeren Dehnungsdifferenzen. Der Einfluss aus der Wellenform ist weniger stark ausgeprägt. So führt der Wechsel der Wellenform vom Sinus zum Dreieck teilweise zu größeren, teilweise zu kleineren Dehnungsdifferenzen. Werden diese beiden Abbildungen mit den Darstellungen der Dehnungsdifferenzen über der logarithmierten Belastungsdauer verglichen (Anhang A-3.2.5, Abbildung A 3.11 und 3.12) so ist fest-

zustellen, dass die Dehnungsdifferenz einen stärkeren Bezug zur Lastwechselzahl als zur Belastungsdauer hat.

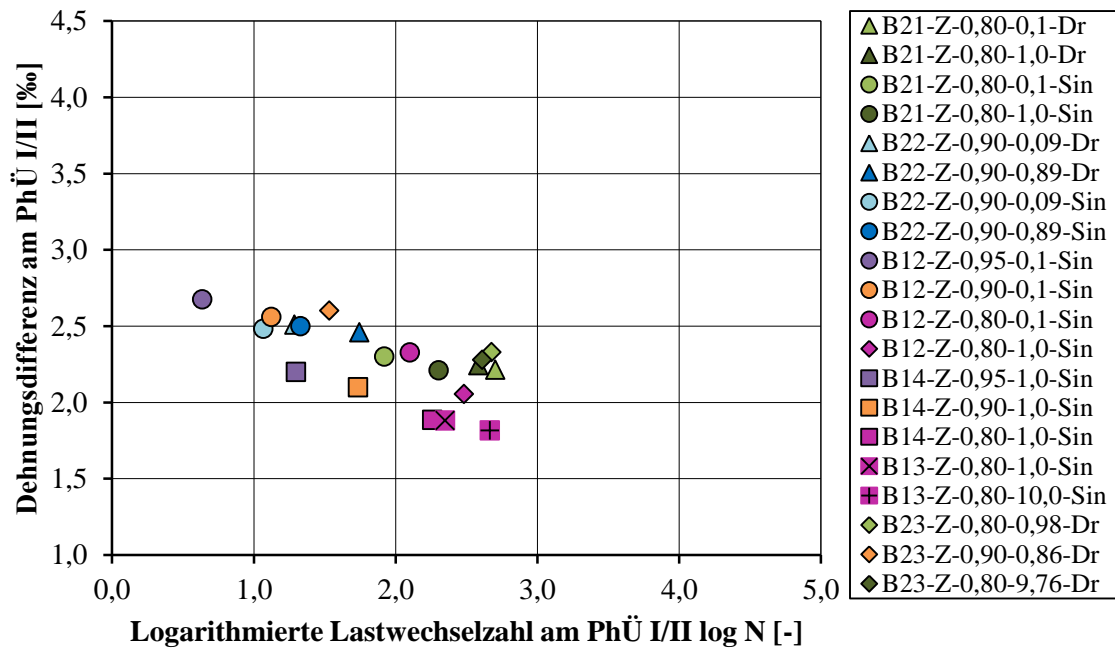


Abbildung 6.25: Differenz der Ober- und Unterdehnung am Phasenübergang I/II dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang I/II (Mittelwerte)

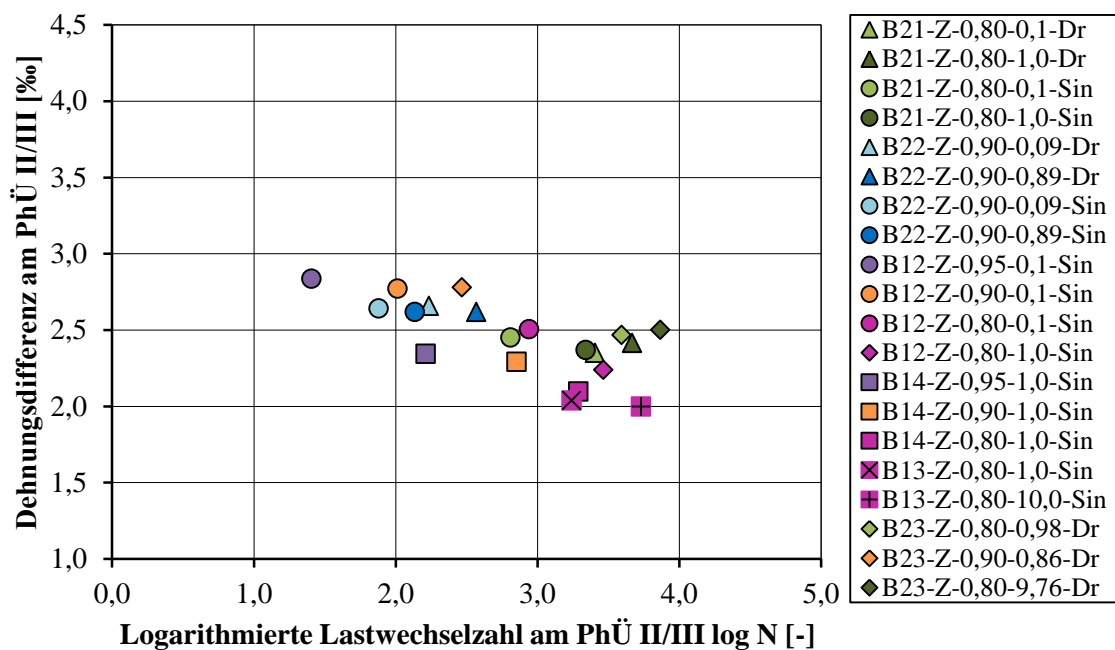


Abbildung 6.26: Differenz der Ober- und Unterdehnung am Phasenübergang II/III dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang II/III (Mittelwerte)

Die vergleichende Auswertung der Versuche mit unterschiedlichen zyklischen Beanspruchungen zeigt, dass sich in Abhängigkeit von der zyklischen Beanspruchung unterschiedliche Dehnungen bei Ober- und Unterspannung sowie unterschiedliche Differenzen dieser Dehnungen an den Phasenübergängen einstellen. Das heißt, die Phasenübergänge treten nicht bei gleichen Ober- und Unterdehnungen bzw. Dehnungsdifferenzen auf. Gleichzeitig sind, über die geprüften Chargen hinweg, gewisse Systematiken der Beeinflussung der Dehnungen bei Oberspannung bzw. Unterspannung durch die drei Belastungsparameter zu erkennen. Die Dehnung bei Unterspannung hat einen stärkeren Bezug zur Belastungsdauer, während die Dehnung bei Oberspannung und die Dehnungsdifferenz jeweils einen stärkeren Bezug zur Lastwechselzahl haben.

Bei unterschiedlichen zyklischen Beanspruchungen treten die Phasenübergänge bei unterschiedlich großen Ober- und Unterdehnungen ein. Bei Betrachtung der Oberdehnung und unterschiedlichen Oberspannungen kann dieses direkt auf die unterschiedlich hohe Beanspruchung zurückgeführt werden. Aufgrund der in Kapitel 5 dokumentierten Ergebnisse kann eine unmittelbare Beeinflussung der sich einstellenden Oberdehnung durch die Belastungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Frequenzen nicht ausgeschlossen werden, insbesondere für sehr hohe Beanspruchungsniveaus. Gleiches gilt für den Wechsel der Wellenform. Eine Quantifizierung ist abhängig von den weiteren Belastungsparametern und daher schwer möglich. Die Größenordnung der Beeinflussung ist für den Wechsel der Oberspannung sicherlich am größten und für den Frequenzwechsel und den Wechsel der Wellenform deutlich kleiner. Die sich einstellenden Unterdehnungen werden durch den Wechsel der Oberspannung nicht unmittelbar beeinflusst. Die unmittelbare Beeinflussung durch die Belastungsfrequenz und die Wellenform ist jedoch schwer abschätzbar.

Unterschiedliche Oberdehnungen bzw. Unterdehnungen an den Phasenübergängen könnten somit einerseits auf unterschiedliche Gefügestände hinweisen und/oder andererseits teilweise durch die unmittelbar vorausgegangenen unterschiedlichen zyklischen Beanspruchungen hervorgerufen werden.

Gesamtdehnungszuwachs

Der im Verlauf der Ermüdungsbeanspruchung vom ersten Lastwechsel bis zum letzten Lastwechsel verursachte Zuwachs der Dehnung bei Oberspannung liegt für den untersuchten hochfesten Beton im Bereich von rund $\Delta\varepsilon_O^{0,0-1,0} = 0,30 - 1,60 \text{ ‰}$ bzw. für die Dehnung bei Unterspannung im Bereich von rund $\Delta\varepsilon_U^{0,0-1,0} = 0,30 - 1,10 \text{ ‰}$ (vgl. Anhang A-3.2.1, Tabellen A 3.14 – A 3.20). Im Verhältnis zur Bruchdehnung bzw. zur oberen Enddehnung ist der Gesamtdehnungszuwachs somit relativ klein. In Abbildung 6.27 sind die Mittelwerte des Gesamtdehnungszuwachses bei Oberspannung für sämtliche Versuche über die logarithmierte Bruchlastwechselzahl $\log N_f$ dargestellt. Es ist zu sehen, dass der Gesamtdehnungszuwachs mit der logarithmierten Bruchlastwechselzahl ansteigt.

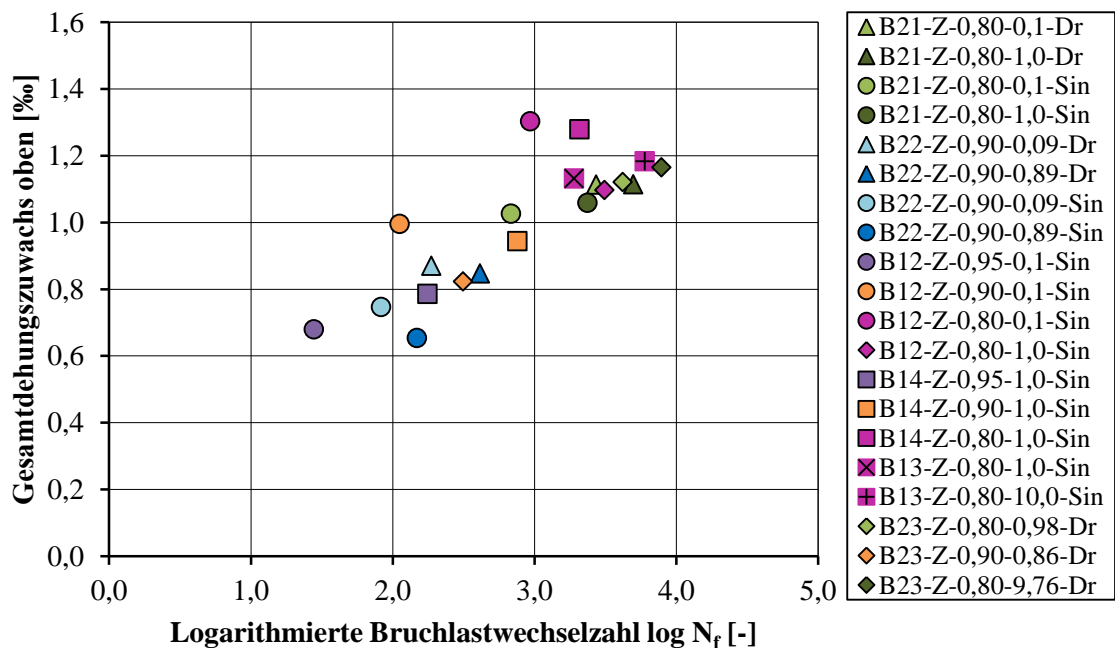


Abbildung 6.27: Gesamtdehnungszuwachs bei Oberspannung dargestellt über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl (Mittelwerte)

Im Anhang A-3.2.5, Abbildung A 3.13 befindet sich ergänzend die Darstellung des Gesamtdehnungszuwachses bei Oberspannung über der logarithmierten Belastungsdauer $\log t_U$. Der Gesamtdehnungszuwachs steigt mit steigender Belastungsdauer ebenfalls an.

Der Gesamtdehnungszuwachs bei Unterspannung ist ebenfalls im Anhang A-3.2.5, Abbildung A 3.14 bzw. A 3.15 über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl bzw. über der logarithmierten Belastungsdauer dargestellt. Der Gesamtdehnungszuwachs bei Unterspannung zeigt, anders als der Zuwachs der Oberdehnung, eher einen Bezug zur Belastungsdauer als zur Bruchlastwechselzahl.

Bruchdehnung und obere Enddehnung

In Abbildung 6.28 bzw. Abbildung 6.29 sind die erreichten Bruchdehnungen bzw. oberen Enddehnungen als Mittelwerte über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl aufgetragen. Im Überblick über sämtliche zyklische Beanspruchungen bestätigt sich, dass die Bruchdehnung bzw. die obere Enddehnung des untersuchten hochfesten Betons wenig von der erreichten Bruchlastwechselzahl beeinflusst werden. Die unter zyklischer Beanspruchung erreichten Bruchdehnungen und Enddehnungen des untersuchten hochfesten Betons liegen dabei im Bereich von rund 2,7 – 4,2 ‰ (vgl. Anhang A-3.2.1, Tabellen A 3.14 – A 3.20).

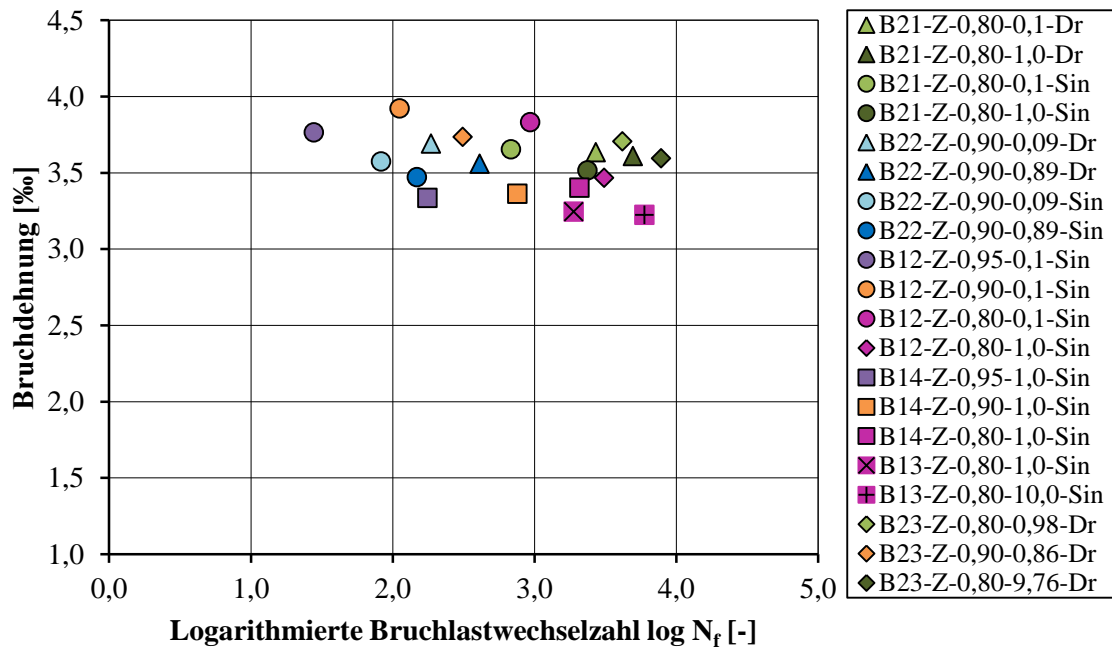


Abbildung 6.28: Bruchdehnung dargestellt über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl (Mittelwerte)

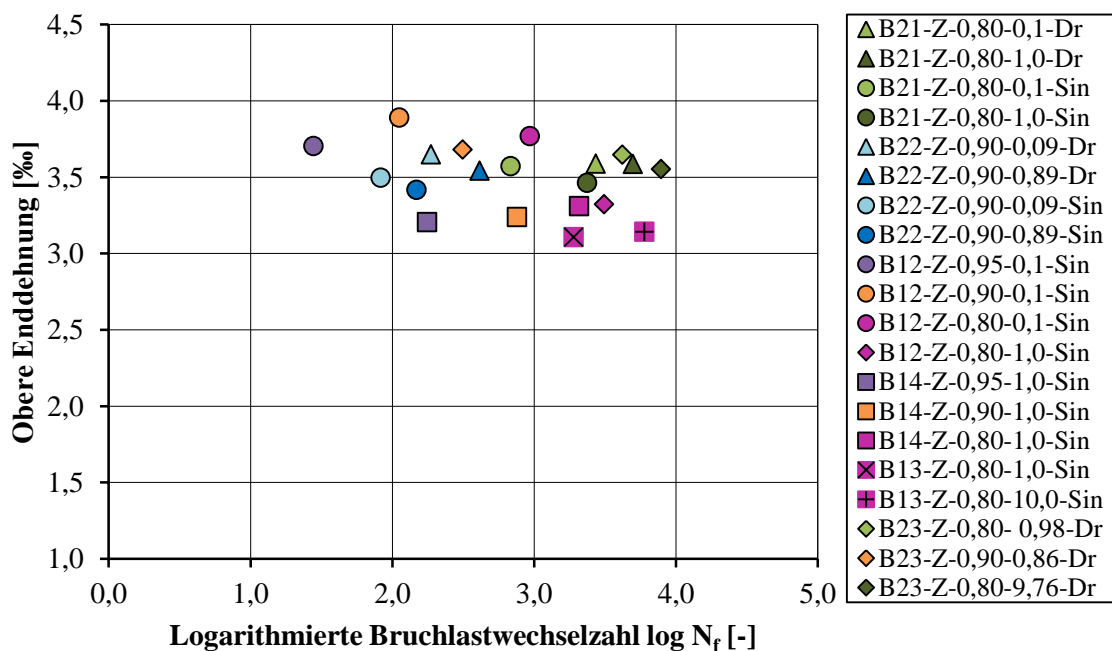


Abbildung 6.29: Obere Enddehnung dargestellt über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl (Mittelwerte)

Im Anhang A-3.2.5, Abbildung A 3.16 und A 3.17 sind die Bruchdehnungen und die oberen Enddehnungen ergänzend über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen $\log t_U$ aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Bruchdehnung und die obere Enddehnung kaum von der Belastungsdauer beeinflusst werden. Dass die Bruchdehnungen des untersuchten hochfesten

Betons sehr ähnlich sind, stimmt mit den Ergebnissen von [Do et al. – 1993] überein. Der Vergleich von Abbildung 6.28 bzw. Abbildung 6.29 mit Abbildung 6.27 zeigt jedoch auch, dass die Schwankungen der Bruch- bzw. oberen Enddehnung im Bereich des bei den verschiedenen zyklischen Belastungen auftretenden oberen Gesamtdehnungszuwachses liegen.

Über die gesamten Versuchsergebnisse betrachtet, werden die oberen Enddehnungen und die Bruchdehnungen nur wenig durch die Bruchlastwechselzahl und die Belastungsdauer beeinflusst. Allerdings ist die Spanne der Bruchdehnungen bzw. der oberen Enddehnungen so groß wie der Wertebereich des Gesamtdehnungszuwachses im Ermüdungsprozess. Insofern eignen sich die obere Enddehnung und die Bruchdehnung nicht als belastbare Grenzwerte der Ermüdungsdehnung im Sinne eines Bruchkriteriums (vgl. Abschnitt 3.2, F5).

Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase

Die vorausgegangenen vergleichenden Auswertungen für die verschiedenen zyklischen Beanspruchungen haben gezeigt, dass die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase $\bar{\epsilon}_{0,N}^{\text{II}}$ deutlich von der jeweiligen Beanspruchung beeinflusst wird. Die Steigung $\bar{\epsilon}_{0,N}^{\text{II}}$ nimmt dabei ab, wenn die Bruchlastwechselzahl infolge der Änderung eines Belastungsparameters vergrößert wird.

Der Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung bei Oberspannung in der zweiten Phase bezogen auf die Lastwechsel $\log \bar{\epsilon}_{0,N}^{\text{II}}$ und den logarithmierten Bruchlastwechselzahlen $\log N_f$ wurde für sämtliche Versuche ausgewertet.

In Abbildung 6.30 ist zu sehen, dass sich für die Ergebnisse aus Versuchen mit verschiedenen zyklischen Beanspruchungen ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl ergibt. Das Wertepaar aus logarithmierter Steigung und logarithmierter Bruchlastwechselzahl, bzw. ihre Position auf dieser Geraden, wird durch jeden der untersuchten Belastungsparameter beeinflusst. Die Ergebnisse für die unterschiedlichen zyklischen Belastungen überschneiden sich dabei.

Bei Unterspannung werden etwas kleinere Steigungen der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase erreicht. Auch hier ergibt sich ein annähernd linearer Zusammenhang zur logarithmierten Bruchlastwechselzahl. Für die späteren Vergleiche mit den Dauerstandversuchen ist die ergänzende Auswertung der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase bezogen auf die Belastungsdauer $\log \bar{\epsilon}_{0,t}^{\text{II}}$ erforderlich. Hierzu ist in Abbildung 6.31 der Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung bei Oberspannung in der zweiten Phase bezogen auf die Dauer der zweiten Phase $\log \bar{\epsilon}_{0,t}^{\text{II}}$ und der logarithmierten Belastungsdauer dargestellt.

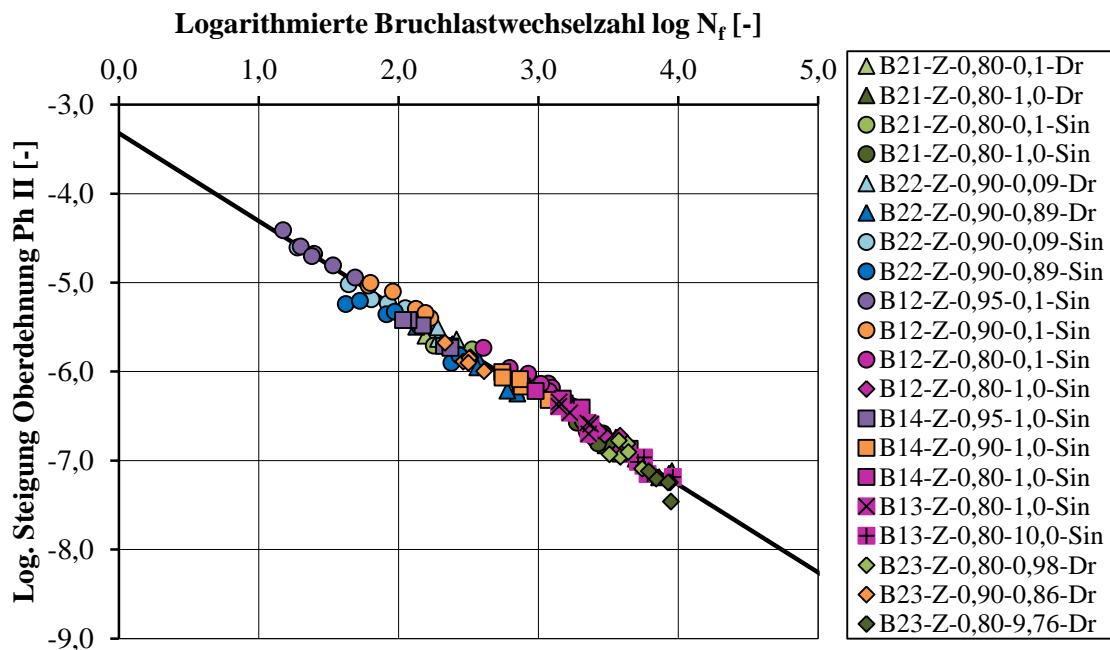


Abbildung 6.30: Logarithmierte Steigung der Oberdehnung in der zweiten Phase dargestellt über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl (Einzelwerte)

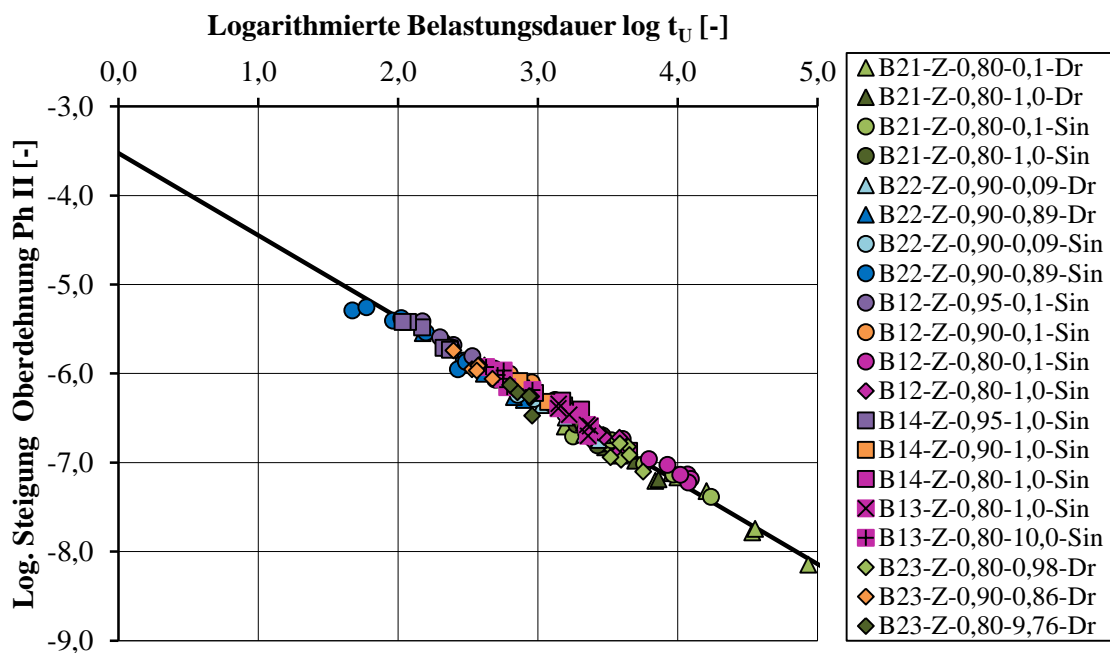


Abbildung 6.31: Logarithmierte Steigung der Oberdehnung in der zweiten Phase dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen (Einzelwerte)

Auch in Abbildung 6.31 überschneiden sich die Ergebnisse der untersuchten zyklischen Belastungen. Eine entsprechende Darstellung für die Steigungen der Unterdehnungsentwicklung $\log \bar{\epsilon}_{U,N}^{II}$ bzw. $\log \bar{\epsilon}_{U,t}^{II}$ sind im Anhang A-3.2.5, Abbildung A 3.18 bzw. Abbildung A 3.19 enthalten. Auch diese Zusammenhänge können jeweils durch eine Gerade

angenähert werden. Für die Steigungen in der zweiten Phase lassen sich folgende Regressionsgeraden angeben:

$$\log N_f = -1,013 \cdot \log \bar{\epsilon}_{0,N}^{\text{II}} - 3,364 \quad r^2 = 0,981 \quad n = 123 \quad (6.5)$$

$$\log N_f = -1,014 \cdot \log \bar{\epsilon}_{U,N}^{\text{II}} - 3,571 \quad r^2 = 0,966 \quad n = 123 \quad (6.6)$$

$$\log t_U = -1,084 \cdot \log \bar{\epsilon}_{0,t}^{\text{II}} - 3,821 \quad r^2 = 0,979 \quad n = 123 \quad (6.7)$$

$$\log t_U = -1,138 \cdot \log \bar{\epsilon}_{U,t}^{\text{II}} - 4,393 \quad r^2 = 0,966 \quad n = 123 \quad (6.8)$$

Bei der genaueren Betrachtung der Ergebnisse der Versuchsserien mit verschiedenen Belastungsfrequenzen zeigt sich, dass die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase bezogen auf die Belastungsdauer $\bar{\epsilon}_{0,t}^{\text{II}}$ bzw. $\bar{\epsilon}_{U,t}^{\text{II}}$ für höhere Belastungsfrequenzen größer ist. Dagegen ergaben die vorherigen Auswertungen, dass höhere Belastungsfrequenzen zu kleineren Steigungen der Dehnungsentwicklungen in der zweiten Phase bezogen auf die Lastwechselzahl $\bar{\epsilon}_{0,N}^{\text{II}}$, $\bar{\epsilon}_{U,N}^{\text{II}}$ führen. Dieses zeigt, dass eine Erhöhung der Belastungsfrequenz zu einer Verkleinerung der Dehnungszunahme pro Lastwechsel, aber gleichzeitig zu einer Vergrößerung der Dehnungszunahme pro Zeiteinheit führt.

Für den untersuchten hochfesten Beton kann insgesamt festgestellt werden, dass für verschiedene zyklische Beanspruchungen ein linearer Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl bzw. der logarithmierten Belastungsdauer besteht und dieser unabhängig von der zyklischen Beanspruchung ist. Gleichzeitig zeigt sich jedoch auch, dass die sich einstellenden Steigungen für die verschiedenen zyklischen Beanspruchungen unterschiedlich sind, wobei sich die Ergebnisse zwischen den zyklischen Beanspruchungen überschneiden. Eine Zuordnung einer Steigung zu einer konkreten zyklischen Beanspruchung ist auf diese Weise noch nicht möglich (vgl. Abschnitt 3.2, F6).

Zur Einordnung der Ergebnisse des untersuchten hochfesten Betons, wird der ermittelte lineare Zusammenhang der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung bei Oberspannung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl mit den in der Literatur für verschiedene Betone dokumentierten Zusammenhängen verglichen.

In [Wefer – 2010] wurde dieser Zusammenhang für einen normalfesten Beton ($f_{c,cube100} = 60 \text{ N/mm}^2$) und einen ultra-hochfesten Beton ($f_{c,cube100} = 160 \text{ N/mm}^2$ bzw. $f_{c,cube100} = 180 \text{ N/mm}^2$) ausgewertet. Dabei wurden Versuche bei einer Prüffrequenz von $f_p = 10 \text{ Hz}$ mit sinusförmiger Wellenform herangezogen. Anders als bei den eigenen Auswertungen berücksichtigt [Wefer – 2010] in seiner Auswertung für beide Betone einen festen

Bereich der Phase II von $N/N_f = 0,20 - 0,80$. [Wefer – 2010] gibt folgende Regressionsgeraden an:

$$\log N_f = -1,098 \cdot \log \bar{\epsilon}_{0,N}^{\text{II}} - 3,810 \quad r^2 = 0,98 \quad n = 22, \text{ für UHPC} \quad (6.9)$$

$$\log N_f = -1,067 \cdot \log \bar{\epsilon}_{0,N}^{\text{II}} - 3,775 \quad r^2 = 0,99 \quad n = 16, \text{ für NC} \quad (6.10)$$

In [Sparks – 1982] wurde unter anderem ein normalfester Beton mit Kies als Gesteinskörnung ($f_{\text{cm,cube100}} \approx 30 \text{ N/mm}^2$) bei dreiecksförmiger Belastung und Be- bzw. Entlastungsgeschwindigkeiten von $\dot{\sigma} = 0,5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ und $\dot{\sigma} = 50 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ untersucht. [Sparks – 1982] gibt folgende Regression an:

$$\log N_f = -0,94 \cdot \log \bar{\epsilon}_{0,N}^{\text{II}} - 2,66 \quad \text{für NC} \quad (6.11)$$

In [Petković – 1991] wird die logarithmierte Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase über die logarithmierte Belastungsdauer ausgewertet. Für die bei einer Belastungsfrequenz von $f_p = 1,0 \text{ Hz}$ sinusförmig durchgeführten Versuche an dem höherfesten Beton ND95 ($f_{c,93d} \approx 75 \text{ N/mm}^2$) ergibt sich der folgende lineare Zusammenhang:

$$\log N_f = -0,8893 \cdot \log \bar{\epsilon}_{0,N}^{\text{II}} - 2,5619 \quad \text{für „ND95“} \quad (6.12)$$

Die oben angegebenen Regressionsgeraden aus der Literatur sind zusammen mit der Regressionsgerade für den hier untersuchten hochfesten Beton (vgl. Gleichung 6.5) in Abbildung 6.32 dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Gerade des hochfesten Betons sehr nah an den von [Wefer – 2010] für einen normalfesten und einen ultra-hochfesten Beton ermittelten Regressionsgeraden liegen. Auch die Steigungen sind ähnlich groß. Die Regressionsgerade nach [Sparks – 1982] für den Beton mit der niedrigsten Festigkeit in dieser Darstellung und die Regressionsgerade nach [Petković – 1991] liegen im Bereich kleiner Bruchlastwechselzahlen deutlich höher als die anderen Geraden. Darüber hinaus verlaufen diese beiden Geraden deutlich steiler als die anderen.

Da die Untersuchungen von [Wefer – 2010] und die hier dokumentierten Untersuchungen in derselben Prüfeinrichtung mit weitestgehend gleicher Versuchsdurchführung stattfanden, wird diesen Ergebnissen eine bessere Vergleichbarkeit unterstellt. Andersherum könnten die Unterschiede zu den beiden anderen Untersuchungen von [Petković – 1991] und [Sparks/Menzies – 1973] bzw. [Sparks – 1982] auf prüfbedingte und/oder messtechnisch bedingte Einflüsse zurückzuführen sein.

Die Ergebnisse von [Wefer – 2010] und die Ergebnisse für den hier untersuchten hochfesten Beton zeigen, dass für Betone unterschiedlicher Festigkeiten sehr ähnliche Zusammenhänge zwischen der logarithmierten Steigung und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl festgestellt werden können, wenn vergleichbare Versuchsrandbedingungen existieren. Das heißt, ein

annähernd gleicher Dehnungszuwachs pro Lastwechsel in der zweiten Phase führt zu einer annähernd gleichen Bruchlastwechselzahl. Hieraus ist jedoch nicht erkennbar, welche zyklische Belastung welchen Dehnungszuwachs hervorruft und damit welche Bruchlastwechselzahl erreicht wird. Für die gleiche zyklische Belastung müssen bei den von [Wefer – 2010] untersuchten Betonen kleinere Dehnungszuwächse pro Lastwechsel auftreten, da die Bruchlastwechselzahlen höher sind als bei dem hier untersuchten hochfesten Beton (vgl. Abbildung 6.4).

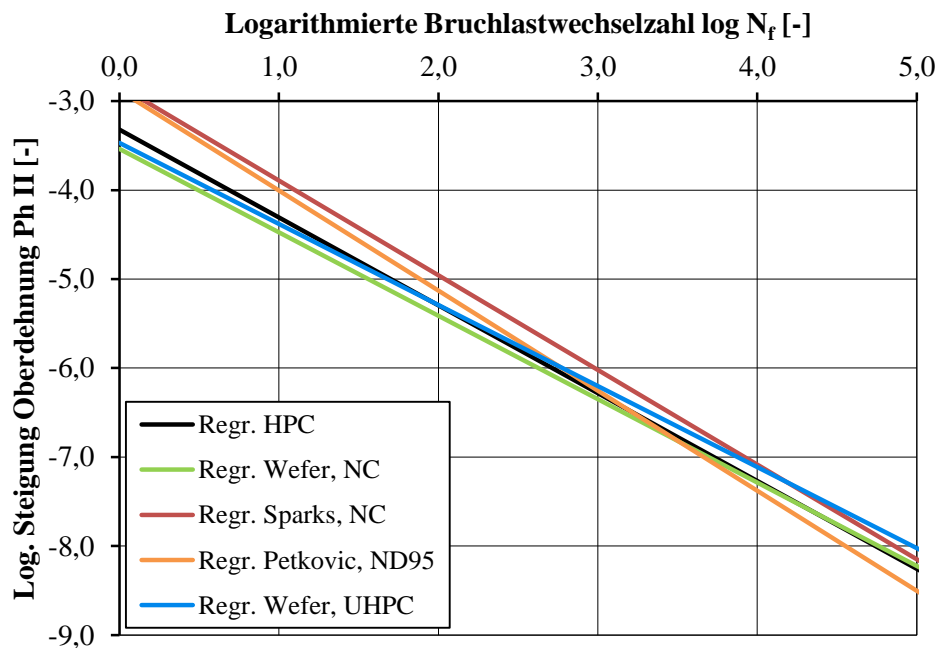


Abbildung 6.32: Vergleich der Regressionsgeraden der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in Phase II für normal-, hoch-, und ultra-hochfeste Betone

Steifigkeiten an den Phasenübergängen

Die Betrachtung der Steifigkeit statt der Dehnungsdifferenz zwischen Ober- und Unterdehnung hat besonders bei Vergleichen von Versuchen bei verschiedenen bezogenen Oberspannungen den Vorteil, dass die Spannungsdifferenz in Bezug zur zugehörigen Dehnungsdifferenz gesetzt wird und somit Versuche bei verschiedenen Oberspannungsniveaus besser vergleichbar sind. Bereits zuvor wurde festgestellt, dass die Ober- und Unterdehnungen an den Phasenübergängen für unterschiedliche zyklische Beanspruchungen unterschiedlich groß sind. Ergänzend werden im Folgenden die Steifigkeiten an den Phasenübergängen vergleichend betrachtet. In Abbildung 6.33 bzw. Abbildung 6.34 sind die Steifigkeiten am Phasenübergang I/II $E_s^{I/II}$ bzw. am Phasenübergang II/III $E_s^{II/III}$ dargestellt.

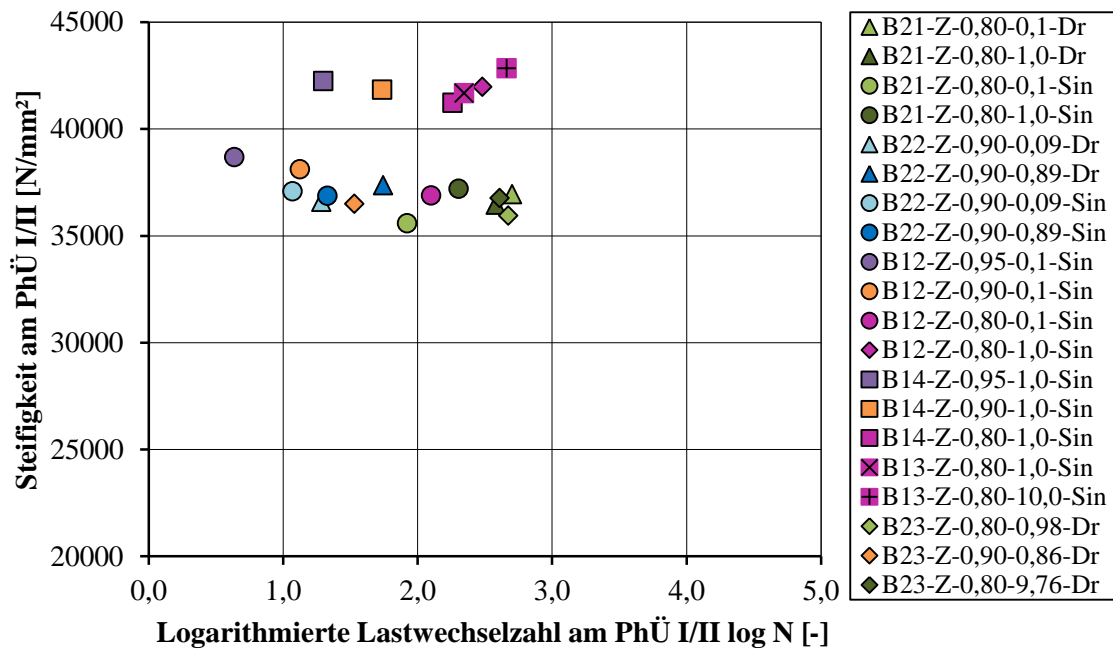


Abbildung 6.33: Steifigkeit am Phasenübergang I/II dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang I/II (Mittelwerte)

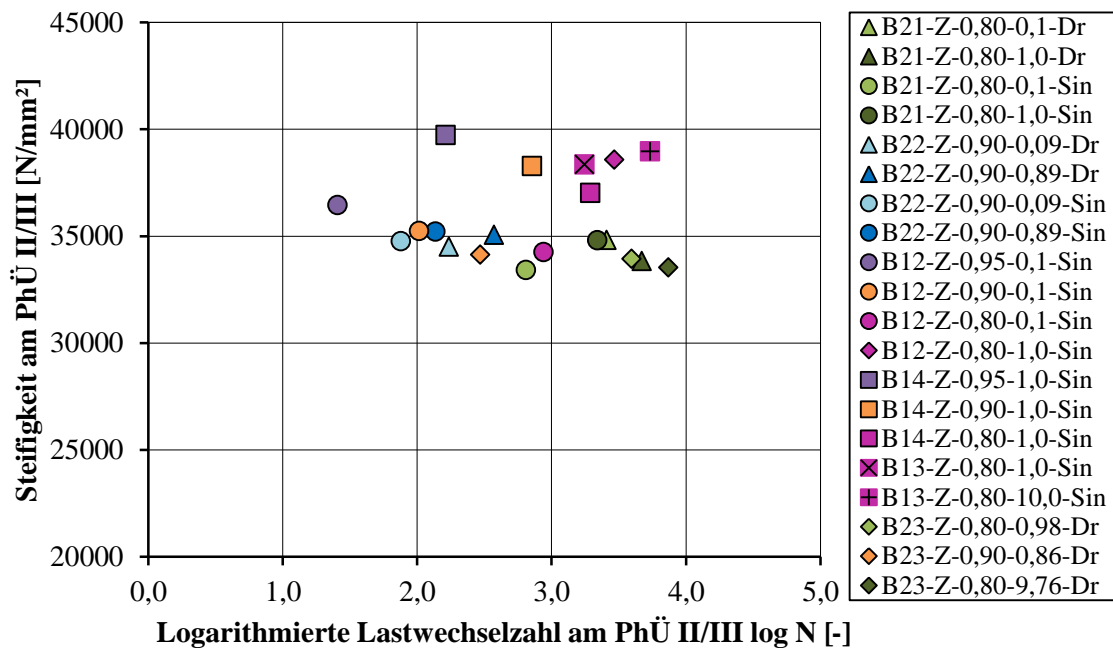


Abbildung 6.34: Steifigkeit am Phasenübergang II/III dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang II/III (Mittelwerte)

Es ist zu sehen, dass die Steifigkeiten am Phasenübergang I/II $E_s^{I/II}$ für niedrigere Oberspannungen kleiner sind. Höhere Belastungsfrequenzen führen dagegen größtenteils zu höheren Steifigkeiten, was auch im Zusammenhang mit den erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten stehen kann (vgl. Abschnitt 5.3). Der Wechsel der Wellenform vom Sinus zum Dreieck führt

dagegen teilweise zu größeren und teilweise zu kleineren Steifigkeiten. Am Phasenübergang II/III ($E_s^{II/III}$) zeigen sich die gleichen Einflüsse wie am Phasenübergang I/II, wie in Abbildung 6.34 zu sehen ist.

Aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 5 ist nicht auszuschließen, dass die sichtbaren Steifigkeiten durch die Belastungsgeschwindigkeit direkt beeinflusst werden. Gleichzeitig ist zu vermuten, dass eine unmittelbare Beeinflussung der sichtbaren Steifigkeit durch den Ober- spannungswechsel und den Wechsel der Wellenform deutlich weniger stark ausgeprägt ist als die unmittelbare Beeinflussung der Steifigkeit durch die Belastungsgeschwindigkeit. Die unterschiedlichen Steifigkeiten an den Phasenübergängen können somit einerseits Hinweise auf unterschiedliche Gefügestände geben und/oder andererseits teilweise durch die unmittelbar vorausgegangene zyklische Beanspruchung beeinflusst sein. Der Vergleich von Abbildung 6.34 und Abbildung A 3.20 zeigt darüber hinaus, dass die Steifigkeit am Phasenübergang II/III weder einen ausgeprägten Bezug zur Lastwechselzahl noch zur Belastungsdauer erkennen lässt.

Prozentualer Steifigkeitsverlust in der zweiten Phase

In Abbildung 6.35 ist der in Phase II eingetretene prozentuale Steifigkeitsverlust bezogen auf die Ausgangssteifigkeit im ersten Lastwechsel ΔE_s^{II} über die Anzahl Lastwechsel bis zum Erreichen des Übergangs II/III dargestellt.

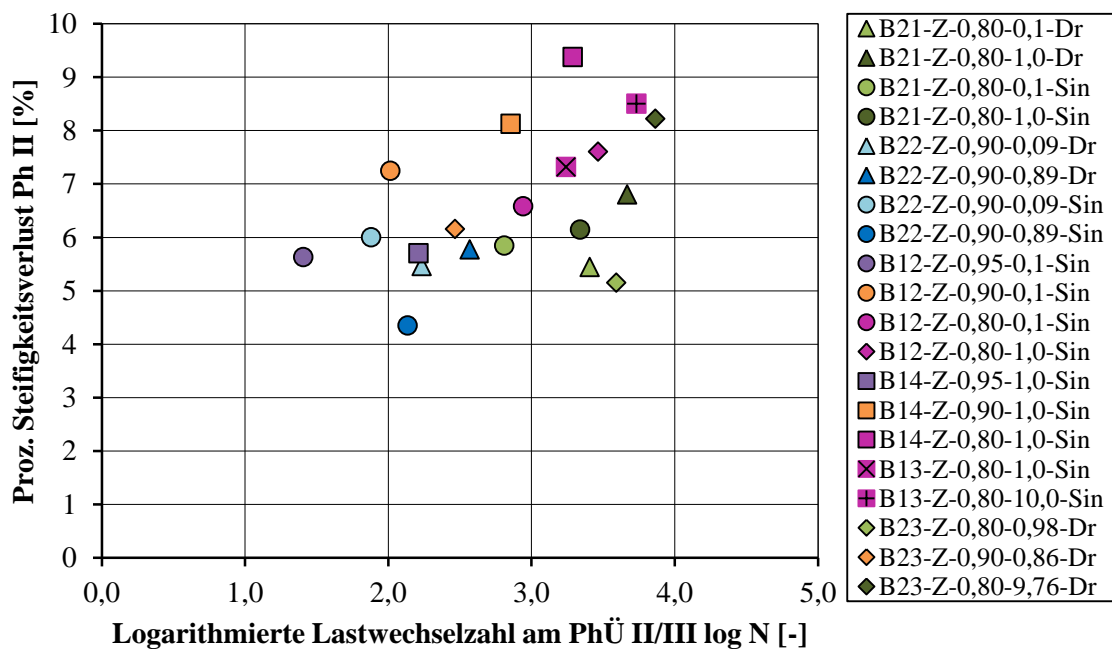


Abbildung 6.35: Prozentualer Steifigkeitsverlust in der zweiten Phase der Steifigkeitsentwicklung dargestellt über der Lastwechselzahl am Übergang II/III (Mittelwerte)

Für niedrigere Oberspannungsniveaus werden teilweise höhere und teilweise niedrigere Steifigkeitsverluste erreicht. Für höhere Belastungsfrequenzen ergeben sich fast ausnahmslos höhere prozentuale Steifigkeitsverluste. Der Wechsel der Wellenform vom Sinus zum Dreieck zeigt dagegen erneut widersprüchliche Ergebnisse. Insgesamt ist ein Anstieg des prozentualen Steifigkeitsverlusts mit höherer Anzahl Lastwechsel und damit eine Abhängigkeit des prozentualen Steifigkeitsverlusts von der Lastwechselzahl zu sehen (vgl. dagegen Abbildung A 3.21).

Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase

Die detaillierte vergleichende Auswertung der Steifigkeitsentwicklungen zeigte eine Verkleinerung des Gefälles der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase mit Bezug zu den Lastwechseln $\bar{E}_{S,N}^{\text{II}}$, wenn infolge der Änderung des Belastungsparameters gleichzeitig eine Vergrößerung der Bruchlastwechselzahl erfolgt (vgl. Abschnitt 6.5.5 - 6.5.7). In Abbildung 6.36 ist das logarithmierte Gefälle der Steifigkeitsentwicklung für alle Versuche über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl dargestellt. Es ist zu sehen, dass sich auch für das Gefälle der Steifigkeitsentwicklung ein linearer Zusammenhang zur Bruchlastwechselzahl ergibt. Auch hier überschneiden sich die für die verschiedenen zyklischen Beanspruchungen ermittelten Ergebnisse. Im Anhang A-3.2.5, Abbildung A 3.22 ist ergänzend das logarithmierte Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase $\bar{E}_{S,t}^{\text{II}}$ über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen dargestellt. Auch hier ergibt sich ein linearer Zusammenhang.

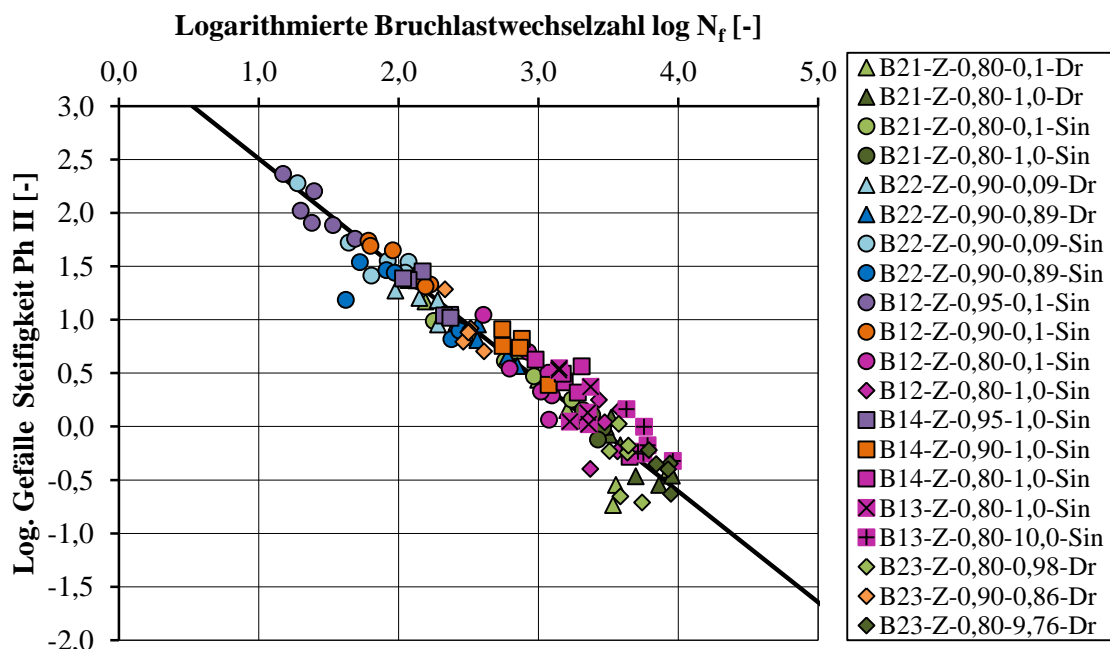


Abbildung 6.36: Logarithmiertes Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase dargestellt über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl (Einzelwerte)

Die Zusammenhänge zwischen dem logarithmierten Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl bzw. der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen lassen sich durch folgende Geraden annähern:

$$\log N_f = -0,963 \cdot \log \bar{E}_{S,N}^{\text{II}} + 3,416 \quad r^2 = 0,940 \quad n = 123 \quad (6.13)$$

$$\log t_U = -0,903 \cdot \log \bar{E}_{S,t}^{\text{II}} + 3,407 \quad r^2 = 0,925 \quad n = 123 \quad (6.14)$$

Im Vergleich zur Auswertung der Steigungen der Dehnungsentwicklungen sind die Abweichungen der Einzelwerte von der Regression für das Gefälle der Steifigkeitsentwicklungen größer. Ähnlich wie bei den Dehnungsentwicklungen ist auch hier durch diesen Zusammenhang keine Zuordnung der zyklischen Beanspruchung zu einem bestimmten Gefälle möglich (vgl. Abschnitt 3.2, F6).

6.5.9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen des hochfesten Betons unter Ermüdungsbeanspruchung wurden unter Berücksichtigung von drei Belastungsparametern systematisch anhand festgelegter Kenngrößen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Dehnungsentwicklungen bei Ober- und Unterspannung sowie die Steifigkeitsentwicklung sowohl durch die bezogene Oberspannung als auch durch die Belastungsfrequenz und durch die Wellenform beeinflusst werden. Damit können die in der Literatur dokumentierten Vermutungen nicht vorhandener oder wenig ausgeprägter Einflüsse auf die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen widerlegt werden. Die für die Bruchlastwechselzahlen ermittelten Beeinflussungen sind auch anhand der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen feststellbar. Die den eigenen Untersuchungen zugrunde liegende Arbeitshypothese kann damit eindeutig bestätigt werden. Die Phaseneinteilung der Dehnungsentwicklungen wird durch die untersuchten Belastungsparameter jedoch nicht wesentlich beeinflusst.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen zudem, dass sich die Einflüsse der verschiedenen Belastungsparameter auch gegenseitig beeinflussen. Ein ähnliches Ergebnis wurde zuvor auch in Bezug auf die Beeinflussung der Bruchlastwechselzahlen festgestellt (vgl. Abschnitt 6.4). Die Bereitstellung analytischer Gleichungen, die die gesamte Dehnungsentwicklung bzw. Steifigkeitsentwicklung unter Berücksichtigung der drei untersuchten Einflüsse allgemeingültig beschreiben, erscheint daher auf dieser Skalenebene als schwer möglich.

Als allgemeingültiger Zusammenhang wurde festgestellt, dass sich die Steigungen in den verschiedenen Phasen der Dehnungsentwicklung jeweils verkleinern, wenn die drei untersuchten Belastungsparameter so verändert werden, dass sich höhere Bruchlastwechselzahlen ergeben. Höhere Bruchlastwechselzahlen stehen somit mit einem kleineren Dehnungszuwachs pro Lastwechsel in Verbindung. Für die logarithmierte Steigung der Dehnungsentwicklung in der

zweiten Phase konnte ein linearer Zusammenhang zur logarithmierten Bruchlastwechselzahl bzw. zur logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen hergestellt werden, der jeweils unabhängig von den drei untersuchten Belastungsparametern ist.

Das Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung verringert sich ebenfalls durch die Veränderung aller drei Belastungsparameter in Richtung höherer Bruchlastwechselzahlen. Höhere Bruchlastwechselzahlen stehen also mit einer kleineren Abnahme der Steifigkeit pro Lastwechsel im Zusammenhang. Auch hier wurde ein linearer Zusammenhang zwischen dem logarithmierten Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl bzw. der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen festgestellt, wobei dieser weniger ausgeprägt ist als bei der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase.

Die vergleichenden Auswertungen der Dehnungen an den Phasenübergängen zeigten, dass sich unterschiedliche Ober- und Unterdehnungen und Dehnungsdifferenzen für die verschiedenen zyklischen Belastungen einstellen. Die Oberdehnungen und Dehnungsdifferenzen stehen eher im Zusammenhang mit den Lastwechselzahlen und scheinen somit von einem zyklischen Effekt beeinflusst zu sein. Dagegen zeigen die Unterdehnungen eher einen Bezug zur Belastungsdauer und scheinen somit von einem „zeitlichen Effekt“ beeinflusst zu sein.

Zusätzlich wurden die Steifigkeiten an den Phasenübergängen sowie der prozentuale Steifigkeitsverlust in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung vergleichend ausgewertet. Auch hier zeigten sich unterschiedliche Steifigkeiten und Steifigkeitsverluste für die verschiedenen zyklischen Beanspruchungen. Die Steifigkeiten an den Phasenübergängen zeigten weder einen Bezug zur Lastwechselzahl noch zur Belastungsdauer. Der prozentuale Steifigkeitsverlust steht jedoch eher im Zusammenhang mit der Lastwechselzahl als mit der Belastungsdauer.

Es wurde erläutert, dass die Dehnungen und die Steifigkeiten durch die untersuchten Belastungsparameter unterschiedlich stark unmittelbar beeinflusst werden. Insofern könnten sie Hinweise auf unterschiedliche Gefügestände bzw. Mikrorisszustände an den Phasenübergängen liefern. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass sie teilweise durch die unmittelbar vorausgegangene zyklische Beanspruchung beeinflusst sind.

Die oberen Enddehnungen sowie die Bruchdehnungen werden in Relation zu ihrer Größenordnung kaum durch die Belastungsparameter beeinflusst, was auch durch statistische Auswertungen weitestgehend bestätigt werden konnte. Da die Spanne der Bruchdehnungen und die der oberen Enddehnungen jedoch dem Bereich des Gesamtdehnungszuwachses bei Ober- und Unterspannung entsprechen, können sie nicht als belastbare Grenzwerte der Ermüdungsdehnung angesehen werden. Der prozentuale Steifigkeitsverlust im gesamten Ermüdungsprozess wird durch die untersuchten Belastungsparameter beeinflusst, aber nicht einheitlich. Es konnte somit für diese Kenngröße weder ein Grenzwertcharakter noch ein systematischer Zusammenhang zur Bruchlastwechselzahl oder zur Belastungsdauer festgestellt werden.

Bei monoton steigender Belastung führen höhere Belastungsgeschwindigkeiten zu kleineren Dehnungen (vgl. Abschnitt 5.3). Anhand der relativen Anfangsdehnungen bei zyklischer Belastung ist dieser Effekt der Belastungsgeschwindigkeit jedoch auch bei dreiecksförmiger Belastung nicht wiedererkennbar. Dieses wird einerseits auf den Lastaufbringungsvorgang zurückgeführt, bei dem die Mittellast mit relativ langsamer Geschwindigkeit und damit eine (relativ betrachtet) höhere Dehnung aufgebracht wird. Andererseits werden die Ober- und Unterdehnungen in den ersten Lastwechseln durch eventuelle Abweichungen des Ist-Wertes der Kraft vom Soll-Wert beeinflusst. Der weitere Verlauf der zyklischen Dehnungen ist bereits durch die vorangegangene Belastung beeinflusst und kann daher nicht für die Untersuchung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die Dehnung zwischen Unter- und Oberspannung verwendet werden.

Die ermittelten Regressionsgeraden zur Beschreibung der linearen Zusammenhänge zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase bzw. dem logarithmierten Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl ermöglichen es, die Bruchlastwechselzahlen abgebrochener Versuche abzuschätzen. Dabei ist die Genauigkeit der Abschätzung aufgrund des doppellogarithmischen Zusammenhangs sowie aufgrund der Streuungen sowohl der Kenngrößen als auch der Bruchlastwechselzahlen begrenzt. Ein Zusammenhang zwischen einer Steigung der Dehnungsentwicklung bzw. einem Gefälle der Steifigkeitsentwicklung und einer bestimmten zyklischen Beanspruchung konnte nicht abgeleitet werden.

Die systematische Auswertung der Dehnungsentwicklungen stellt die Basis dar für die Vergleiche mit dem Dehnungsverhalten bei monoton steigender Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung sowie für die Beurteilung der Hypothesen zum Ermüdungsverhalten von Betonen. Es wurden insbesondere Hinweise auf zeitliche und zyklische Effekte gefunden. Die Bruchdehnungen werden zudem im weiteren zur Überprüfung des Envelope-Konzeptes und der „Schädigungshypothese“ nach [Pfanner – 2003] (Abschnitt 3.3, Frage F7) herangezogen.

Die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen werden durch die untersuchten Belastungsparameter nachweisbar beeinflusst. Zusammenhänge zwischen dem Dehnungsverhalten bei Ermüdungsbeanspruchung und dem Dehnungsverhalten bei monoton steigender Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung werden daher schwer zu finden sein (vgl. Abschnitt 3.3, Fragen F8 – F10).

Es muss insgesamt davon ausgegangen werden, dass eine qualitativ ähnliche Beeinflussung der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen auch bei normalfesten Betonen besteht.

Kapitel 7

Dauerstandversuche

7.1 Einordnung

In der Literatur sind Untersuchungen dokumentiert, in denen das Materialverhalten von normal- und hochfesten Betonen bei Dauerstandbeanspruchung untersucht wurde. Bei diesen Untersuchungen wurde meistens der Einfluss der Beanspruchungshöhe auf die Dehnungsentwicklung betrachtet oder die Dauerstandfestigkeit ermittelt (vgl. Abschnitt 2.3). Ziel der eigenen Dauerstandversuche war es dagegen, Erkenntnisse zu möglichen Zusammenhängen des Dehnungsverhaltens hochfester Betone bei Ermüdungsbeanspruchung und bei Dauerstandbeanspruchung mit hohen Beanspruchungsniveaus zu gewinnen. Hierfür wurden aufeinander abgestimmte Versuche bei Dauerstandbeanspruchung und Ermüdungsbeanspruchung durchgeführt. Aufgrund von z. B. anderen Versuchsdurchführungen bei den in der Literatur dokumentierten Untersuchungen, konnten deren Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit nicht für Vergleiche herangezogen werden.

Im Rahmen der eigenen Untersuchungen wurden Dauerstandversuche bei Beanspruchungsniveaus von $S_D = 0,90$ und $S_D = 0,80$ durchgeführt, die den bezogenen Oberspannungen der zyklischen Vergleichsversuche entsprachen (Versuchsblöcke D1 und E4, Charge B23). Die Dauerstandbelastung wurde mit den gleichen Belastungsgeschwindigkeiten $\dot{k} = 44,53 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ und $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$, wie sie in den zyklischen Versuchen mit dreiecksförmiger Wellenform verwendet wurden, bis zur vorgesehenen Beanspruchung gesteigert. Die Proben wurden in Anlehnung an die Dauer der zyklischen Versuche mindestens 14 Stunden beansprucht. Anschließend wurden die Restfestigkeiten festgestellt.

Zur Vorbereitung der vergleichenden Auswertungen der Dehnungsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung und Dauerstandbeanspruchung (vgl. Abschnitt 8.3), werden in diesem Kapitel zunächst die Dehnungsentwicklungen des hochfesten Betons unter Dauerstandbeanspruchung, auch unter Berücksichtigung der verschiedenen Anfahrsgeschwindigkeiten, systematisch und detailliert ausgewertet. Hierzu werden analog zum Vorgehen bei der Auswertung der zyklischen Versuche Kenngrößen definiert, die auch im Hinblick auf die spätere Beantwortung der in Abschnitt 3.3 aufgeführten Fragen ausgewertet werden (vgl. Abschnitt 8.3). Der Vollständigkeit halber beinhaltet dieses Kapitel auch die Auswertung der Restfestigkeiten und der Spannungs-Dehnungslinien bei Wiederbelastung.

7.2 Kenngrößen der Dehnungsentwicklungen

In Anlehnung an die Kenngrößen der Dehnungsentwicklung bei zyklischer Beanspruchung werden auch hier entsprechende Kenngrößen verwendet, die im Folgenden zusammengestellt sind. Der hochgestellte Index bezeichnet den „Zeitpunkt“ im Dehnungsverlauf. Der tiefgestellte Index „D“ weist auf die Belastungsart hin.

Allgemein:

$\Delta t^{I;II;III}$	[s]	Dauer der Phasen I, II bzw. III
t_U	[s]	Belastungsdauer bis zum Versagen
I/II	[-]	Übergang von der ersten zur zweiten Phase
II/III	[-]	Übergang von der zweiten zur dritten Phase

Dehnungsentwicklung:

ε_D^t	[%]	Dehnung bei einer bestimmten Belastungsdauer t $\varepsilon_D^{0,0}$ Anfangsdehnung beim Erreichen des Beanspruchungsniveaus
ε_D^B	[%]	Bruchdehnung beim Eintritt des Dauerstandversagens
$\varepsilon_D^{I/II}, \varepsilon_D^{II/III}$	[%]	Dehnung beim Übergang von Phase I zu Phase II bzw. von Phase II zu Phase III
$\Delta \varepsilon_D^t$	[%]	Dehnungszuwachs bis zu einer Belastungsdauer t
$\Delta \varepsilon_D^{I;II;III,B}$	[%]	Dehnungszuwachs in Phase I, II bzw. III der Dehnungsentwicklung; Phase III beinhaltet die Bruchdehnung
$\Delta \varepsilon_D^{I-III,B}$	[%]	Gesamtdehnungszuwachs während der Belastungsdauer bis zum Versagen t_U (inklusive der Bruchdehnung)
$\bar{\varepsilon}_{D,t}^{I;II;III}$	[s ⁻¹]	Steigung der Dehnungsentwicklung in den verschiedenen Phasen bezogen auf die Dauer (t). Aufgrund des nichtlinearen Verlaufs der Dehnungsentwicklung in Phase I und III entspricht dieser Wert in diesen Phasen einer idealisierten Steigung. $\bar{\varepsilon}_{D,t}^{I;III} = \frac{\Delta \varepsilon_D^{I;III}}{\Delta t^{I;III}}; \bar{\varepsilon}_{D,t}^{II} = \text{Re } g(\varepsilon_D^{II}(t))$

Die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase wurde jeweils als Regression ermittelt. Die Kenngrößen der Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung sind in Abbildung 7.1 dargestellt.

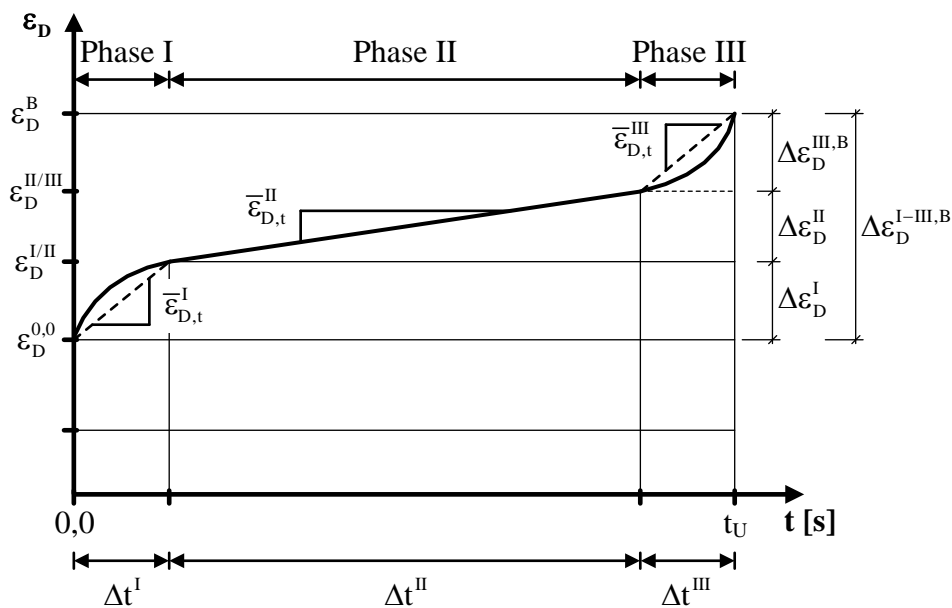


Abbildung 7.1: Kenngrößen der Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung

Die Einzel- und Mittelwerte der zuvor beschriebenen Kenngrößen sind im Anhang A-4.2, Tabelle A 4.1 - A 4.3 zusammengestellt. Für das Beanspruchungsniveau $S_D = 0,80$ kann, wie bereits zuvor erläutert, nur die Anfangsdehnung und der Bereich bis zum Versuchsabbruch ausgewertet werden.

7.3 Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei $S_D = 0,90$ und $S_D = 0,80$

In Abbildung 7.2 und Abbildung 7.3 sind die Dehnungsentwicklungen der Dauerstandversuche für beide Beanspruchungsniveaus und jeweils für beide Anfahrsgeschwindigkeiten über die Belastungsdauer aufgetragen. Ergänzend sind diese Dehnungsentwicklungen in Anhang A-4.1, Abbildung A 4.1 und A 4.2 über der logarithmierten Belastungsdauer dargestellt. Als Bezugswert für die Beanspruchungsniveaus diene wie bei den zyklischen Versuchen die als Mittelwert anhand von drei Proben ermittelte Referenzdruckfestigkeit. Das tatsächliche Beanspruchungsniveau ist somit, ähnlich wie bei Ermüdungsversuchen, von der tatsächlichen Druckfestigkeit der geprüften Probe abhängig und damit nicht exakt bestimmbar. Mit der Belastungsdauer ist dabei die Zeit gemeint, in der die volle Dauerstandbeanspruchung auf die Probe einwirkt.

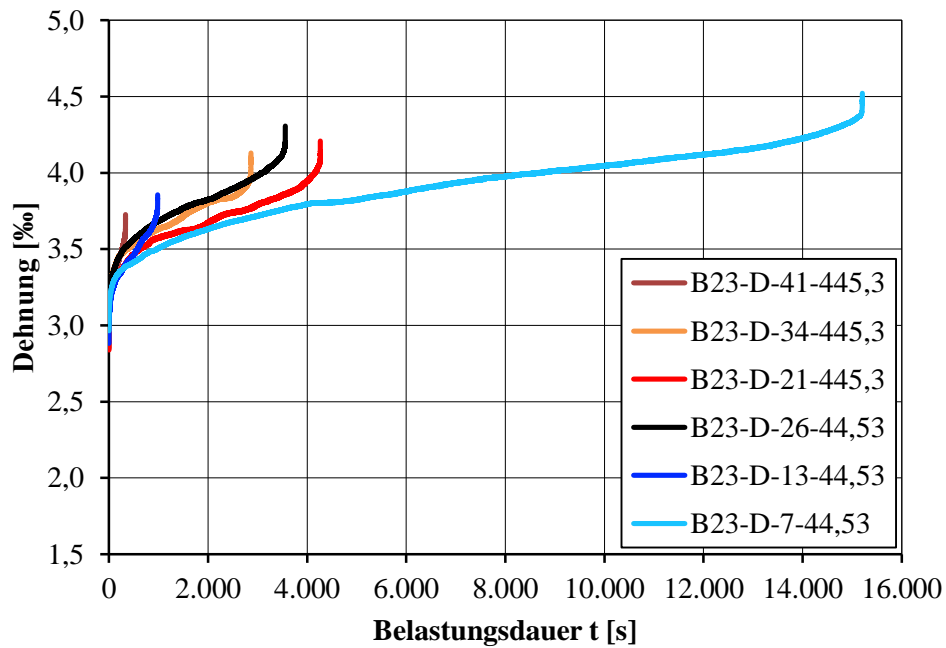


Abbildung 7.2: Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,90$

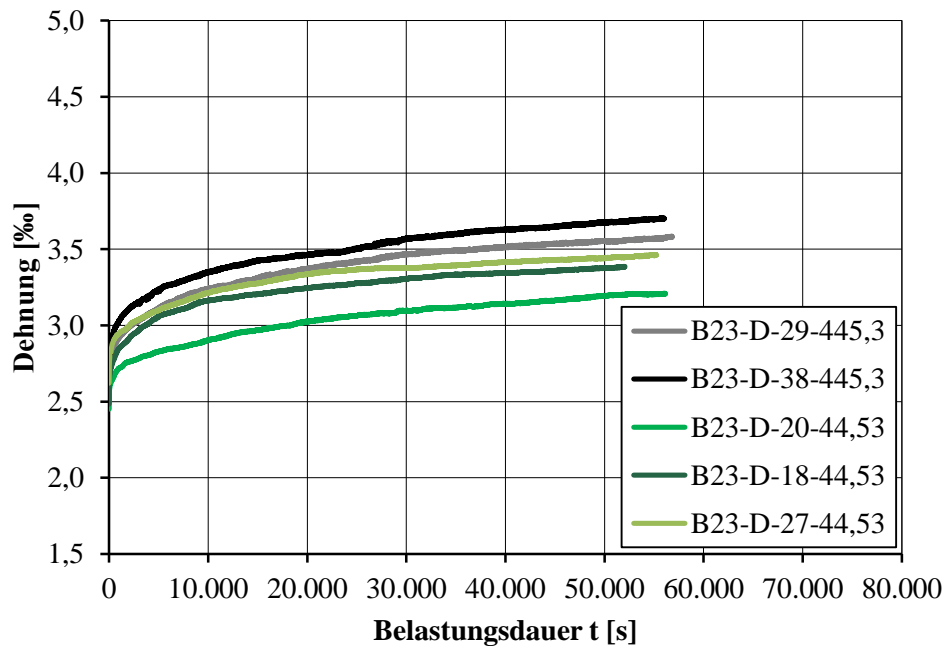


Abbildung 7.3: Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,80$

Für das Beanspruchungsniveau $S_D = 0,90$ ist in Abbildung 7.2 zu sehen, dass die Dehnungsentwicklungen den bereits aus der Literatur bekannten dreiphasigen Verlauf bis zum Versagen aufweisen (vgl. Abschnitt 2.3). Direkt vor dem Versagen kommt es zu einem starken Anstieg der Dehnung, was an den annähernd senkrecht nach oben verlaufenden Dehnungsentwicklungen zu erkennen ist. In diesem Bereich ist noch kein Kraftabfall eingetreten. Die Probe hat also noch nicht versagt. Dass dieser innerhalb einer sehr kurzen Zeitdauer eintretende starke

Anstieg der Dehnung erfasst werden konnte, liegt an den verwendeten und im Vergleich zu üblichen Dauerstandversuchen sehr hohen Abtastraten (vgl. Abschnitt 4.5).

Auffällig ist, dass die Probe B23-D-7 eine deutlich längere Belastungsdauern bis zum Versagen zeigt, als die anderen Proben. Bei Dauerstandversuchen gleicher Anfahrsgeschwindigkeiten ist das Beanspruchungsniveau der einzige Beanspruchungsparameter. Die Ursache für einzelne sehr kurze oder sehr lange Standzeiten bis zum Versagen müssen daher vom Mittelwert der Festigkeiten nach unten bzw. oben abweichende tatsächliche Druckfestigkeiten der einzelnen Proben und damit abweichende, tatsächliche Beanspruchungsniveaus sein.

Für das Beanspruchungsniveau $S_D = 0,80$ sind die Dehnungsentwicklungen in Abbildung 7.3 dargestellt. Bei diesen Versuchen traten keine Brüche auf. Dementsprechend ist hier kein dreiphasiger Verlauf zu erkennen. Abbildung 7.3 lässt vermuten, dass bereits die zweite Phase der Dehnungsentwicklung mit einem annähernd linearen Dehnungszuwachs erreicht ist. Wird diese Abbildung jedoch mit einer anderen Skalierung der Abszisse dargestellt, so zeigt sich, dass die zweite Phase ggf. noch nicht erreicht ist (vgl. Anhang A-4.1, Abbildung A 4.3).

Eine gesicherte Phaseneinteilung kann nur vorgenommen werden, wenn die zweite Phase der Dehnungsentwicklung bereits deutlich länger anhält als die erste Phase bzw. wenn der Übergang in die dritte Phase vollzogen ist. Es wird daher im Folgenden für die Dauerstandversuche mit $S_D = 0,80$ keine Unterteilung in eine vermeintlich erste und zweite Phasen vorgenommen. Vergleiche bestimmter, an Phasen gekoppelter Dehnungskenngrößen sind damit nur für das Beanspruchungsniveau $S_D = 0,90$ möglich.

Um trotzdem Vergleiche der Dehnungen zwischen den beiden Beanspruchungsniveaus zu ermöglichen, wurden zwei Vergleichszeitpunkte $t_1 = 200$ s und $t_2 = 320$ s unter Berücksichtigung der kürzesten Belastungsdauer bis zum Versagen sowie unter Berücksichtigung der Übergänge in die dritte Phase festgelegt. Die Dehnungen zu den Vergleichszeitpunkten und die Dehnungszuwächse bis zu diesen Zeitpunkten sind in Abbildung A 4.4 bzw. A 4.5 dargestellt und in Tabelle A 4.1 bzw. A 4.3 enthalten.

Anhand dieser grafischen Darstellungen bzw. tabellarischen Zusammenstellungen im Anhang zeigt sich insgesamt, dass höhere Beanspruchungsniveaus zu höheren Anfangsdehnungen $\varepsilon_D^{0,0}$ und zu höheren Dehnungsniveaus für gleiche Belastungsdauern führen (ε_D^{200s} , ε_D^{320s}). Die Dehnungszuwächse bis zu den Vergleichszeitpunkten ($\Delta\varepsilon_D^{200s}$ bzw. $\Delta\varepsilon_D^{320s}$) sind bei dem höheren Beanspruchungsniveau $S_D = 0,90$ größer als bei $S_D = 0,80$ (A-4.2, Tabelle A 4.1 und A 4.3). Gleichzeitig ergeben sich für die höhere Beanspruchung kürzere Standzeiten. Darüber hinaus ist ablesbar, dass bei $S_D = 0,90$ für längere Belastungsdauern kleinere Steigungen in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung $\bar{\varepsilon}_{D,t}^{\text{II}}$ und größere Bruchdehnungen ε_D^{B} auftreten (Tabelle A 4.2). Damit werden die in der Literatur dokumentierten Erkenntnisse soweit bestätigt (vgl. Abschnitt 2.3).

7.4 Detaillierte Betrachtung der Dehnungsentwicklungen bei $S_D = 0,90$

Die Dehnungsentwicklungen bei einer Dauerstandbeanspruchung von 90 % der Druckfestigkeit werden nun genauer betrachtet (Tabelle A 4.2), wobei zunächst keine Unterscheidung hinsichtlich der Geschwindigkeiten der Lastaufbringung vorgenommen wird. Die Phasenübergänge liegen im Mittel über alle Proben bei 16 % und 93 % der Beanspruchungsdauer.

Die erreichten Dehnungen bei den Übergängen von Phase I zu Phase II bzw. von Phase II zu Phase III sowie die Dehnungszuwächse in den einzelnen Phasen unterscheiden sich zum Teil deutlich zwischen den einzelnen Versuchen. Hinweise auf die Existenz einer kritischen Dehnung am Übergang von Phase I zu Phase II, wie sie von [Smadi et al. – 1985] vermutet wird, und am Übergang zwischen Phase II und III können den eigenen Versuchsergebnissen somit nicht entnommen werden. Die unterschiedlichen Dehnungen an den Phasenübergängen könnten insofern Hinweise auf unterschiedliche Gefügestände bzw. Mikrorisszustände sein. Der Gesamtdehnungszuwachs sowie die Dehnungszuwächse in den einzelnen Phasen steigen mit ansteigender Belastungsdauer an.

Für das Beanspruchungsniveau $S_D = 0,90$ wurden Bruchdehnungen im Bereich von $\varepsilon_D^B = 3,70\% - 4,45\%$ erreicht. Die Bruchdehnungen nach Dauerstandbeanspruchung sind damit zum überwiegenden Teil größer als die Bruchdehnungen aus den Referenzversuchen mit monoton steigender Beanspruchung. Sie liegen eher im Bereich der Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung mit einer Belastungsgeschwindigkeit von $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ (vgl. Anhang A-2.2, Tabelle A 2.1).

Wie bereits in Abschnitt 2.3 erläutert, beschreiben [Awad / Hilsdorf – 1971] für den von ihnen untersuchten normalfesten Beton einen linearen Zusammenhang zwischen der Bruchdehnung und der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen $\log t_U$. Für den hier untersuchten hochfesten Beton wurden die Bruchdehnungen im Anhang A-4.3, Abbildung A 4.6 über die logarithmierte Belastungsdauer bis zum Versagen $\log t_U$ dargestellt. Die Bruchdehnungen sind für längere Belastungsdauern größer, was auf einen zeitlichen Effekt hinweist. Die Bruchdehnungen lassen sich durch folgende Regressionsgerade beschreiben:

$$\log t_U = 1,906 \cdot \varepsilon_D^B - 4,471 \quad r^2 = 0,957 \quad n = 6 \quad (7.1)$$

In Analogie zu den zyklischen Versuchen ist es sinnvoll zu prüfen, ob auch bei Dauerstandversuchen ein linearer Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase $\log \bar{\varepsilon}_{D,t}^{\text{II}}$ und der logarithmierten Belastungsdauer $\log t_U$ besteht. Wie in Anhang A-4.3, Abbildung A 4.7 zu sehen ist, ergibt sich auch bei Dauerstandbeanspruchung ein linearer Zusammenhang. Die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase ist dabei für längere Belastungsdauern kleiner. Der lineare Zusam-

menhang zwischen der logarithmierten Steigung und der logarithmierten Belastungsdauer lässt sich durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$\log t_U = -1,156 \cdot \log \bar{\epsilon}_{D,t}^{\text{II}} - 4,364 \quad r^2 = 0,997 \quad n = 6 \quad (7.2)$$

Da die Belastungsdauer bis zum Versagen gleichzeitig in direktem Zusammenhang zum tatsächlich vorhandenen Beanspruchungsniveau steht, kann also anhand der Steigung in der zweiten Phasen der Dehnungsentwicklungen eine qualitative Bewertung des tatsächlichen Beanspruchungsniveaus im jeweiligen Versuch im Verhältnis zu anderen Versuchen vorgenommen werden.

Es stellt sich die Frage, ob die Anfangsdehnungen Hinweise auf Abweichungen des vorgesehenen zum tatsächlichen Beanspruchungsniveau liefern. In diesem Fall sollte ein Zusammenhang zwischen der Anfangsdehnung und der Belastungsdauer bis zum Versagen erkennbar sein. Die Auswertung in Anhang A-4.3, Abbildung A 4.8 zeigt jedoch, dass sich für das Beanspruchungsniveau $S_D = 0,90$ kein sinnvoller Zusammenhang zwischen der Anfangsdehnung direkt nach Aufbringung der Dauerstandbeanspruchung und der Belastungsdauer bis zum Versagen erkennen lässt. Die Bewertung einer möglichen (kleinen) Abweichung zwischen dem vorgesehenen und dem tatsächlichen Beanspruchungsniveau anhand unterschiedlicher Anfangsdehnungen ist daher nicht möglich.

7.5 Einfluss verschiedener Belastungsgeschwindigkeiten

Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit bei der Steigerung der Last bis zur vorgesehenen Dauerstandbeanspruchung auf die Dehnungsentwicklung soll im Folgenden genauer betrachtet werden. Aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 5 zum Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung ist zu erwarten, dass die Anfangsdehnungen nach vorheriger höherer Belastungsgeschwindigkeit kleiner sind.

Anhand der Kenngrößen der Dehnungsentwicklungen für $S_D = 0,90$ ist zu sehen, dass zwar der Mittelwert der Anfangsdehnungen für die höhere Belastungsgeschwindigkeit kleiner ist, die Einzelwerte der Anfangsdehnungen jedoch keine einheitliche Beeinflussung durch die Belastungsgeschwindigkeit zeigen (Anhang A-4.2, Tabelle A 4.2). Bei dem Beanspruchungsniveau $S_D = 0,80$ ist der Mittelwert der Anfangsdehnung für die höhere Belastungsgeschwindigkeit sogar geringfügig größer (vgl. Tabelle A 4.1). Auch hier zeigen die Einzelwerte der Anfangsdehnung keine einheitliche Beeinflussung durch die Belastungsgeschwindigkeit.

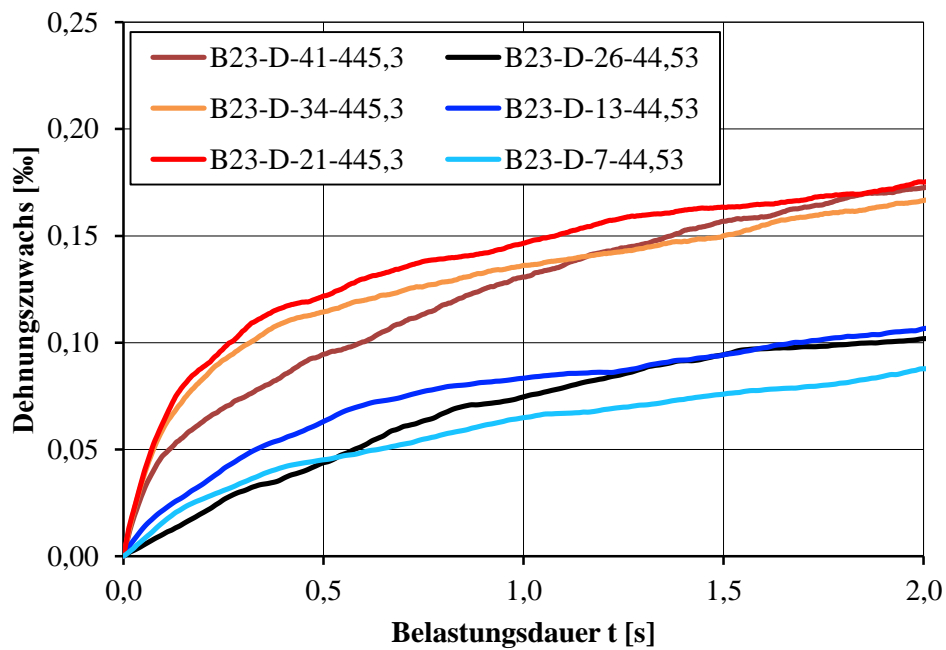
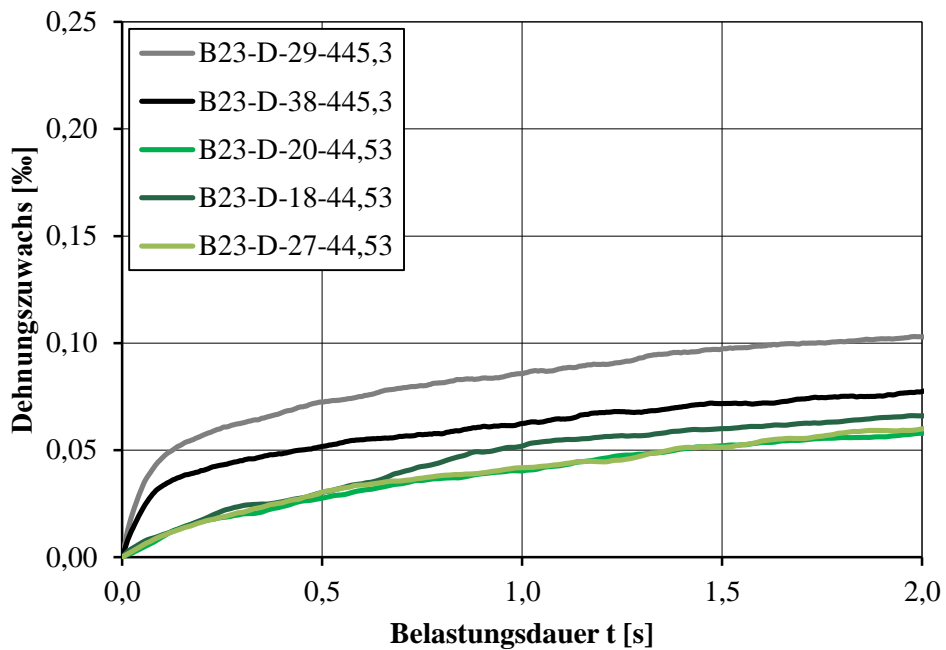
Die nicht feststellbare einheitliche Beeinflussung der Anfangsdehnung bei Dauerstandbeanspruchung ist einerseits auf die Art der Versuchsdurchführung und andererseits auf unterschiedliche tatsächliche Beanspruchungsniveaus zurückzuführen.

Anders als bei Versuchen mit monoton steigender Beanspruchung wird bei Dauerstandversuchen bei Belastung eine bestimmte Kraft angefahren. In Abhängigkeit von der Querschnittsfläche der einzelnen Probe entspricht diese Kraft einer Spannung, die somit für die einzelnen Proben etwas unterschiedlich sein kann. Im Gegensatz zu Spannungs-Dehnungslinien infolge monoton steigender Beanspruchung, bei denen die Spannungen unter Berücksichtigung der Querschnittsfläche der jeweiligen Probe berechnet werden, besteht hier also keine exakte Vergleichsspannung. Unterschiedliche tatsächliche Beanspruchungsniveaus führen gleichzeitig zu abweichenden Dehnungen. Insgesamt ist der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit daher bei Dauerstandbeanspruchung weniger sichtbar als bei monoton steigender Beanspruchung.

Nun wird der Dehnungszuwachs zu Beginn der Dauerstandbeanspruchung betrachtet. Dieser ist zahlenmäßig und grafisch in Anhang A-4.2, Tabelle A 4.1 bzw. A 4.3 und Abbildung A 4.4 bzw. A 4.5 zu sehen. Für das Beanspruchungsniveau $S_D = 0,90$ zeigt sich, dass der Dehnungszuwachs $\Delta\varepsilon_D^t$ bis zu einer Belastungsdauer von ca. $t_2 = 320$ s nach vorheriger höherer Anfahrsgeschwindigkeit einheitlich größer ist. Danach scheint der Einfluss des tatsächlich vorhandenen Beanspruchungsniveaus auf die Dehnungen eine größere Relevanz zu entwickeln und überlagert den Geschwindigkeitseinfluss (Abbildung A 4.4). Für das niedrigere Beanspruchungsniveau $S_D = 0,80$ bestätigt sich diese Feststellung, wenngleich die Unterschiede des Dehnungszuwachses hier kleiner sind als bei dem höheren Beanspruchungsniveau (Tabelle A 4.1, Abbildung A 4.5). Der Einfluss des tatsächlichen Beanspruchungsniveaus ist für $S_D = 0,80$ zudem weniger stark ausgeprägt.

Für $S_D = 0,90$ zeigen die Werte der Dehnungen an den Phasenübergängen sowie die Dehnungszuwächse in den einzelnen Phasen keine einheitliche Beeinflussung durch die Belastungsgeschwindigkeit mehr. Insgesamt kann somit ein ausgeprägter Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit nur für die Anfangsphase der Dauerstandbeanspruchung und nicht für die gesamte Belastungsdauer festgestellt werden.

Im Hinblick auf die extrem kurze Wirkungsdauer hoher Beanspruchungen im Lastwechsel bei Ermüdungsbeanspruchung ist der Dehnungszuwachs im Bereich bis zu einer Belastungsdauer von $t = 2$ s (im Folgenden „Frühphase“ genannt) in Abbildung 7.4 bzw. Abbildung 7.5 für beide Beanspruchungsniveaus dargestellt. Insbesondere für $S_D = 0,90$ ist in der Frühphase ein deutlich größerer Dehnungszuwachs vorhanden, wenn zuvor die Belastung mit einer höheren Belastungsgeschwindigkeit gesteigert wurde. Auch für das niedrigere Beanspruchungsniveau $S_D = 0,80$ sind Unterschiede erkennbar, wobei die Unterschiede weniger ausgeprägt sind als bei $S_D = 0,90$.

Abbildung 7.4: Dehnungszuwachs in der Frühphase bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,90$ Abbildung 7.5: Dehnungszuwachs in der Frühphase bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,80$

Es zeigt sich also, dass der Dehnungszuwachs in der Frühphase konstanter Dauerstandbeanspruchung bei höherer vorheriger Belastungsgeschwindigkeit größer ist. Dieser Effekt könnte darauf zurückgeführt werden, dass sich viskose Verformungsanteile aufgrund der höheren Belastungsgeschwindigkeit während der Belastung in einem geringeren Maß einstellen und dann nachträglich während der konstanten Belastung auftreten (vgl. hierzu Abbildung 2.7). Die Frühphase der Dehnungsentwicklung unter konstant gehaltener Belastung scheint somit

von der vorherigen Belastungsgeschwindigkeit beeinflusst zu sein. Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangt auch [Schwabach – 2005], der niederzyklische Versuche mit Haltephasen bei jedoch deutlich niedrigeren Belastungsgeschwindigkeiten durchführte.

Ein solcher Einfluss auf die Dehnungen ist insbesondere hinsichtlich des Dehnungsverhaltens bei zyklischer Beanspruchung mit hohen Oberspannungen interessant. Dort sind hohe vorangegangene Belastungsgeschwindigkeiten und sehr kurze Beanspruchungsdauern charakteristisch.

7.6 Resttragverhalten

An den Proben des niedrigeren Beanspruchungsniveaus $S_D = 0,80$ wurden die Restfestigkeiten nach Belastungsdauern von ca. 14 Stunden ermittelt. In Abbildung 7.6 sind die Spannungs-Dehnungslinien bei Ent- und Wiederbelastung gemeinsam dargestellt. Für die Probe B23-20 konnten die Verformungen nicht erfasst werden. Zu sehen sind die Spannungs-Dehnungslinien ab dem Zeitpunkt der Entlastung.

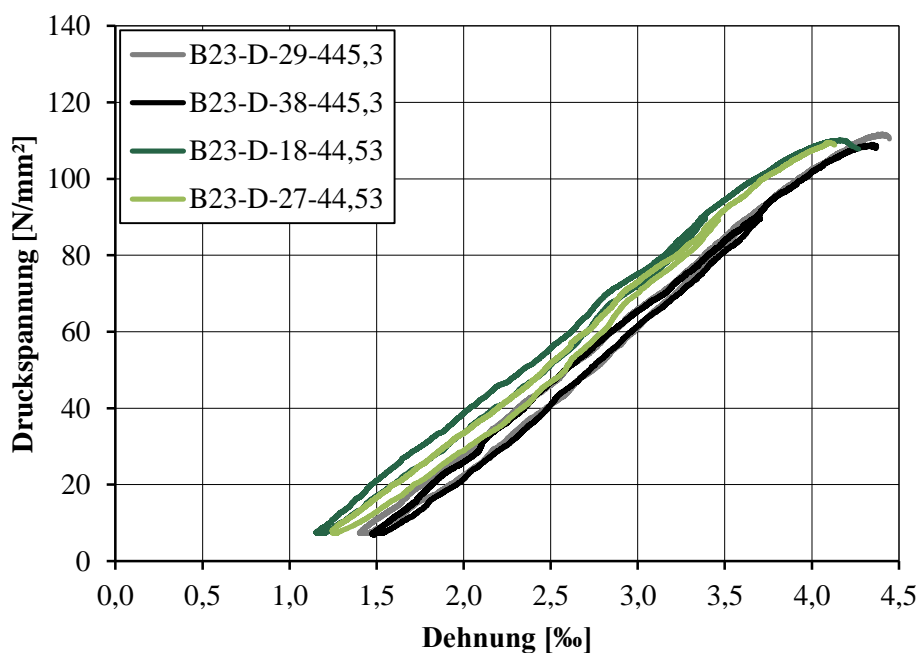


Abbildung 7.6: Spannungs-Dehnungslinien bei Prüfung der Restfestigkeiten ($S_D = 0,80$)

Es ist erkennbar, dass die Größenordnung der Dehnungen bei Ent- und Wiederbelastung in erster Linie von der unter Dauerstandbeanspruchung entstandenen Dehnung (Startpunkt der Entlastung) abhängig ist. Nach Entlastung kommt es zu einem deutlich ausgeprägten Rückkriechen. Die Standzeit bei Minimallast war dabei unterschiedlich lang. Sie betrug maximal ca. 180 Sekunden (Probe B23-29). Es zeigt sich bei Wiederbelastung, dass die am Ende der Dauerstandbelastung erreichte Dehnung (Startpunkt Entlastung) bei Wiederbelastung erst bei

einer etwas höheren Spannung als die Dauerstandbeanspruchung erreicht wurde. Gleichzeitig ist der fehlende Dehnungsbetrag kleiner als der Dehnungsanteil, der infolge Rückkriechens zurückgegangen ist. Es werden also Teile der bei Entlastung zurückgegangenen Dehnung bereits in einem frühen Bereich der Wiederbelastung erneut erzeugt.

In Tabelle 7.1 sind die Einzel- und Mittelwerte der Druckfestigkeiten, Bruchspannungen und die dazugehörigen Dehnungen zusammengestellt. Wie bereits erwähnt, hängt die Größe der Dehnungen bei Wiederbelastung in erster Linie von der erreichten Dehnung am Ende der Dauerstandbeanspruchung ab. Zahlenmäßige Vergleiche der Dehnungen zwischen den einzelnen Versuchen sind somit wenig aussagekräftig. Es fällt jedoch auf, dass die Probe B23-20 einen etwas höheren Wert der Restfestigkeit aufweist als die anderen Proben. Die Restfestigkeiten und Bruchspannungen der anderen Proben sind ähnlich groß und liegen dabei im Bereich der Referenzdruckfestigkeiten und Referenzbruchspannungen (vgl. Anhang A-2.2, Tabelle A 2.1). Die Bruchdehnungen und Dehnungen bei Maximallast sind jedoch deutlich größer als bei den Referenzversuchen, was auf die vorherige Dauerbelastung zurückzuführen ist.

Probe	Geschwindigkeit beim Anfahren [$\text{kN}\cdot\text{s}^{-1}$]	Beanspruchungsniveau S_D [-]	Druckfestigkeit [N/mm^2]	Dehnung bei Druckfestigkeit [%]	Bruchspannung [N/mm^2]	Bruchdehnung [%]
B23-D-20	44,53	0,80	116,0	-	-	-
B23-D-18	44,53	0,80	110,1	4,16	107,4	4,29
B23-D-27	44,53	0,80	109,4	4,11	108,4	4,17
Mittelwert			111,8	4,14	107,9	4,23
B23-D-29	445,3	0,80	111,8	4,40	110,4	4,45
B23-D-38	445,3	0,80	109,1	4,35	107,9	4,37
Mittelwert			110,5	4,38	109,2	4,41

Tabelle 7.1: Spannungs- und Dehnungswerte bei Prüfung der Restfestigkeiten

Die größere Restfestigkeit der Probe B23-20 könnte mit einer gegenüber den anderen Proben erhöhten Druckfestigkeit im Zusammenhang stehen. Anhand von Abbildung 7.3 ist zu sehen, dass das Dehnungsniveau dieser Probe während der gesamten Belastungsdauer deutlich niedriger als bei den Vergleichsproben war. Es ist daher zu vermuten, dass diese Probe bereits vor dem Versuch eine höhere Druckfestigkeit aufwies und damit einem niedrigeren tatsächlichen

Beanspruchungsniveau bei Dauerstandbeanspruchung ausgesetzt war als vorgesehen. Deutliche Abweichungen von der Referenzfestigkeit, wie von [Awad / Hilsdorf – 1971] oder [Han – 1996] dokumentiert, konnten in den eigenen Untersuchungen nicht festgestellt werden. Insgesamt können aus den ermittelten Spannungs-Dehnungslinien bei Wiederbelastung keine belastbaren Rückschlüsse auf bereits induzierte Schädigungen gezogen werden.

7.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wurden die Dehnungsentwicklungen für zwei Beanspruchungsniveaus von $S_D = 0,90$ und $S_D = 0,80$ vergleichend und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten ausgewertet. Das niedrigere Beanspruchungsniveau $S_D = 0,80$ führte zu niedrigeren Dehnungsniveaus nach gleicher Belastungsdauer als das höhere Beanspruchungsniveau $S_D = 0,90$. Für das Beanspruchungsniveau $S_D = 0,90$ wurden bei längeren Belastungsdauern größere Bruchdehnungen erreicht. Zwischen den Bruchdehnungen und der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen wurde ein linearer Zusammenhang festgestellt. Die für den hochfesten Beton ermittelten Ergebnisse bestätigen insofern die in der Literatur dokumentierten Erkenntnisse.

Bei längeren Belastungsdauern bis zum Versagen treten kleinere Steigungen in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung, d. h. kleinere Dehnungszuwächse pro Zeiteinheit, auf. Auch zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Belastungsdauer wurde ein linearer Zusammenhang festgestellt. Einheitliche Dehnungen an den Phasenübergängen im Sinne einheitlicher kritischer Werte, die die nächste Phase der Dehnungsentwicklung einleiten, konnten für das Beanspruchungsniveau $S_D = 0,90$ nicht festgestellt werden. Diese unterschiedlichen Dehnungen an den Phasenübergängen könnten somit Hinweise auf unterschiedliche Gefügestände sein.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass höhere Belastungsgeschwindigkeiten zu einem größeren Dehnungszuwachs in der Frühphase der Dehnungsentwicklung unter konstanter Beanspruchung führen. Aufgrund dieses Ergebnisses ist zu vermuten, dass auch bei zyklischer Beanspruchung die Ausprägung des Dehnungszuwachses pro Lastwechsel im Bereich hoher Beanspruchung durch die Geschwindigkeit bei Belastung in Kombination mit dem Belastungsverlauf beeinflusst wird.

Die nach vorheriger Dauerstandbeanspruchung ermittelten Restfestigkeiten liegen überwiegend im Bereich der Werte der Referenzversuche mit monoton steigender Beanspruchung. Die Bruchdehnungen und die Dehnungen bei Maximallast sind jedoch deutlich größer als bei den Referenzversuchen. Die Restfestigkeiten liefern somit keine Hinweise auf möglicherweise vorhandene Schädigungen infolge der vorherigen Dauerstandbeanspruchung.

Die Ergebnisse der Auswertung zeigen insgesamt, dass die Dehnungsentwicklung unter Dauerstandbeanspruchung stark durch das tatsächlich vorhandene Beanspruchungsniveau und die Belastungsdauer beeinflusst wird. Die Belastungsgeschwindigkeit hat bei dieser Versuchsart nur einen Einfluss auf die Frühphase der Dehnungsentwicklung bei konstanter Beanspruchung.

Für die weiteren vergleichenden Untersuchungen der Dehnungsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung und Dauerstandbeanspruchung können die Dehnungsentwicklungen bei $S_D = 0,90$ verwendet werden, da diese bis zum Versagen ermittelt werden konnten. Hierbei erscheint insbesondere die genauere vergleichende Untersuchung der Steigungen in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung, der Dehnungen an den Phasenübergängen und der Bruchdehnungen als sinnvoll.

Kapitel 8

Kombinierte Auswertung des Materialverhaltens bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten

8.1 Überblick

In Kapitel 5, Kapitel 6 und Kapitel 7 wurden die drei Beanspruchungsarten monoton steigende Beanspruchung, Ermüdungsbeanspruchung und Dauerstandsbeanspruchung zunächst einzeln betrachtet und damit die Grundlagen für die in diesem Kapitel folgenden kombinierten Auswertungen gelegt.

Im folgenden Abschnitt 8.2 werden zunächst mögliche Zusammenhänge des Dehnungsverhaltens bei Ermüdungsbeanspruchung und monoton steigender Beanspruchung unter Berücksichtigung der Fragen F7 und F8 aus Abschnitt 3.3 untersucht. In Abschnitt 8.3 schließt sich die Betrachtung möglicher Zusammenhänge bei Ermüdungsbeanspruchung und Dauerstandsbeanspruchung an, unter Berücksichtigung der Fragen F9 und F10 aus Abschnitt 3.3.

In Abschnitt 8.4 folgt die Überprüfung des in der Literatur dokumentierten Ansatzes zur Approximation von bei unterschiedlichen Belastungsfrequenzen ermittelten Bruchlastwechselzahlen durch die Berücksichtigung der bei erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten ermittelten Druckfestigkeiten (vgl. Frage F11, Abschnitt 3.3). Hierauf aufbauend wird in Abschnitt 8.5 ein Zusammenhang zwischen der Dehnungsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung und der Bruchlastwechselzahl abgeleitet (vgl. Frage F6, Abschnitt 3.2).

Die Ergebnisse der kombinierten Auswertung des Materialverhaltens bei den drei Beanspruchungsarten werden im Weiteren bei der Beurteilung der in der Literatur dokumentierten Hypothesen (Kapitel 9) sowie für die Entwicklung einer Modellvorstellung (Kapitel 10) herangezogen.

8.2 Vergleich der zyklischen Dehnungsentwicklungen mit den Spannungs-Dehnungslinien infolge monoton steigender Beanspruchung

8.2.1 Einordnung

Zusammenhänge zwischen dem Dehnungsverhalten bei Ermüdungsbeanspruchung und dem Dehnungsverhalten bei monoton steigender Beanspruchung könnten für die Entwicklung von Modellen genutzt werden. Solche Modelle wären insofern vorteilhaft, als dass das Ermüdungsverhalten aufgrund von deutlich weniger aufwendigen Versuchen mit monoton steigender Beanspruchung beurteilt werden könnte. Hierzu sind in der Literatur Überlegungen dazu dokumentiert, inwiefern Dehnungen zu markanten „Zeitpunkten“ der zyklischen Dehnungsentwicklungen auf der Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung wiederzufinden sind (vgl. Abschnitt 2.4.1, Abbildung 2.26). Aufgrund solcher Überlegungen formuliert [Balázs – 1994] für Verbundschlupf ein verformungsbasiertes Versagenskriterium (vgl. Abschnitt 2.4.1). Konsistente experimentelle Untersuchungen zu möglichen Zusammenhängen des Dehnungsverhaltens von Beton bei Ermüdungsbeanspruchung und monoton steigender Beanspruchung sind in der Literatur jedoch nicht dokumentiert.

Darüber hinaus sind in der Literatur Untersuchungen dokumentiert, in denen die Anwendbarkeit des Envelope-Konzeptes überprüft wird. Für hochfeste Betone zeigen die dokumentierten Untersuchungen, dass die zyklischen Bruchdehnungen gleich groß oder unwesentlich größer [Petković – 1991] [Do et al. – 1993] bzw. kleiner als die Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung sind [Kono et al. – 2008]. Die Bruchdehnung wird von der Regelungsart beeinflusst. In der Literatur sind jedoch häufig Untersuchungen dokumentiert, bei denen in den verglichenen Versuchen mit monoton steigender Beanspruchung und zyklischer Beanspruchung unterschiedliche Regelungsarten verwendet wurden.

Die Relation der Bruchdehnungen infolge monoton steigender und zyklischer Beanspruchung ist einerseits hinsichtlich der Beurteilung der Gültigkeit des Envelope-Konzeptes, aber insbesondere auch für die dem Schädigungsmodell von [Pfanner – 2003] zugrunde liegende „Schädigungshypothese“ von entscheidender Bedeutung. Ist die Bruchdehnung infolge zyklischer Beanspruchung kleiner als die Bruchdehnung infolge monoton steigender Beanspruchung, kann ein Zustand gleicher in Schädigung dissipierter Energien nicht erreicht werden (vgl. Abschnitt 2.4.1, Abbildung 2.25) und die „Schädigungshypothese“ wäre nicht gültig.

Die in Kapitel 5 dokumentierten eigenen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung des hochfesten Betons durch erhöhte Belastungsgeschwindigkeiten beeinflusst wird. Hinsichtlich der Dehnungsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung wurde in Kapitel 6 eine Beeinflussung durch die bezogene Oberspannung, die Belastungsfrequenz und die Wellenform festgestellt. Insbeson-

derer der Aspekt der Belastungsgeschwindigkeit bzw. der Belastungsfrequenz ist bei Vergleichen des Dehnungsverhaltens beider Beanspruchungsarten zu berücksichtigen.

Im Folgenden werden daher die kraftgeregelt durchgeführten Versuche mit monoton steigender Beanspruchung und zyklischer Beanspruchung bei jeweils gleichen Belastungsgeschwindigkeiten verglichen (Versuchsblöcke E4 und S3), um einerseits mögliche Zusammenhänge des Dehnungsverhaltens (Frage F8, Abschnitt 3.3) und andererseits die Relation der Bruchdehnungen beider Beanspruchungsarten (Frage F7, Abschnitt 3.3) zu untersuchen.

8.2.2 Vorbemerkungen zum Vergleich des Dehnungsverhaltens

Das Dehnungsverhalten bei zyklischer und monoton steigender Belastung wird im Folgenden anhand der Dehnungsentwicklung bei Oberspannung (zyklisch) und der Spannungs-Dehnungslinie (monoton steigend) verglichen. Aufgrund ihrer abschnittsweise konstanten Belastungsgeschwindigkeit werden ausschließlich zyklische Versuche mit dreiecksförmiger Wellenform für die Vergleiche herangezogen.

Zu beachten ist, dass die Dehnungsverläufe infolge monoton steigender und zyklischer Beanspruchung nicht nur hinsichtlich ihrer Form, sondern vor allen Dingen hinsichtlich ihrer Entstehung grundlegend unterschiedlich sind. Während sich die Spannungs-Dehnungslinie infolge einer kontinuierlich steigenden Beanspruchung auch kontinuierlich ergibt, stellt die Dehnungsentwicklung bei Oberspannung eine Aneinanderreihung der Dehnungen zu den Zeitpunkten der Maxima der Belastung dar. Diese Dehnungspeaks bei Oberspannung treten im Belastungsverlauf also nicht unmittelbar hintereinander, sondern nur einmal pro Lastwechsel auf. Dazwischen wird der Beton jeweils einmal ent- und belastet.

Gleichzeitig ist die Höhe der Beanspruchung bei beiden Beanspruchungsarten nur zu einem Zeitpunkt, und zwar wenn die monoton steigende Beanspruchung die Oberspannung der zyklischen Beanspruchung durchläuft, gleich und ansonsten immer unterschiedlich. Aufgrund der unterschiedlich hohen Beanspruchungen, z. B. zu den „Zeitpunkten“ der Phasenübergänge, können anhand der Vergleiche der Spannungs-Dehnungslinien infolge monoton steigender Beanspruchung und der Dehnungsentwicklungen infolge zyklischer Beanspruchung keine Rückschlüsse auf ähnliche Gefügestände gezogen werden.

8.2.3 Vergleich der Dehnungsverläufe

Für den Vergleich werden die Dehnungsverläufe infolge monoton steigender und zyklischer Beanspruchung mit gleicher Belastungsgeschwindigkeit jeweils gemeinsam dargestellt. Hierfür werden in die Spannungs-Dehnungsdiagramme der Versuche mit monoton steigender Beanspruchung die Dehnungsentwicklungen infolge zyklischer Beanspruchung integriert. Beide Koordinatensysteme teilen sich die Abszisse, auf der die Dehnung dargestellt ist. Für die Dehnungsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung wurden der Mittelwert der Anfangs-

dehnungen (Punkt A), der Dehnungen an den zyklischen Phasenübergängen (Punkte B und C) sowie der Mittelwert der Bruchdehnungen (Punkt D) zahlenmäßig übertragen.

Als Phasenübergänge werden jeweils die gemittelten Werte $N/N_f = 0,11$ und $N/N_f = 0,93$ anteilig von der Achse N/N_f berücksichtigt (vgl. Abschnitt 6.5.3). Der zwischen diesen Werten eingezeichnete Verlauf der zyklischen Dehnungsentwicklung ist jeweils nur qualitativ eingezeichnet. Ergänzend sind die Einzelwerte der zyklischen Bruchdehnungen und die zugehörigen Bruchspannungen zu sehen. Die vorgegebene Oberspannung bei Ermüdungsbeanspruchung ist ebenfalls dargestellt.

Abbildung 8.1 und Abbildung 8.2 zeigen die Dehnungsverläufe infolge monoton steigender und zyklischer Beanspruchung der Versuche aus Charge B21 für eine bezogene Oberspannung $S_O = 0,80$ und zwei unterschiedliche Belastungsgeschwindigkeiten. Entsprechende Darstellungen für die Versuche der Chargen B22 bei dem höheren Beanspruchungsniveau $S_O = 0,90$ sind in Anhang A-5.1 enthalten. Wird zunächst der Beginn der Ermüdungsbeanspruchung betrachtet (Punkt A), so ist für die niedrigere Belastungsgeschwindigkeit $\dot{k} = 44,53 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ eine gute Übereinstimmung der Anfangsdehnungen bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung zu erkennen (Abbildung 8.1). Dagegen ist auffällig, dass die zyklischen Anfangsdehnungen bei der höheren Belastungsgeschwindigkeit von $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ etwas größer sind als bei der entsprechenden Oberspannung nach vorausgegangener monotoner Beanspruchungssteigerung (Abbildung 8.2).

Die Ursache hierfür ist in der Art der Belastungsaufbringung zu finden (vgl. Abschnitt 4.4.2). So wurde die Dehnungsmittellage bei den Ermüdungsversuchen bei einer gegenüber den Versuchen mit monoton steigender Beanspruchung deutlich kleineren Belastungsgeschwindigkeit aufgebracht. Zudem gab es bei Mittellast eine kurze Verweildauer. Beim Beginn der zyklischen Beanspruchung war somit im Vergleich zum Versuch mit monoton steigender Beanspruchung bei gleichem Beanspruchungsniveau bereits eine größere Dehnung als Ausgangswert der zyklischen Dehnungsentwicklung erreicht. Diese Dehnungsdifferenz ist in den anschließenden oberen Peaks der Dehnungsentwicklung enthalten. Bei den Versuchen mit der niedrigeren Belastungsgeschwindigkeit $\dot{k} = 44,53 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ ist diese Differenz der Ausgangsdehnung kleiner, sodass die Oberdehnung im ersten Lastwechsel eine bessere Übereinstimmung mit der Dehnung infolge monotoner Beanspruchungssteigerung zeigt.

Zudem können die Oberdehnungen in den ersten Lastwechseln durch eventuelle Abweichungen der Ist-Werte der Kraft von den Soll-Werten der Kraft beeinflusst sein (vgl. Abschnitt 6.3).

Im weiteren Verlauf der Ermüdungsbeanspruchung stellt sich der erste Phasenübergang ein (Punkt B). Wird die Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung im Bereich von Punkt B betrachtet, ist keine Änderung des Dehnungsverhaltens zu erkennen. Die zyklische Dehnung beim Übergang von Phase II zu Phase III (Punkt C) ist deutlich kleiner als die Dehnung bei Maximallast (monoton steigend).

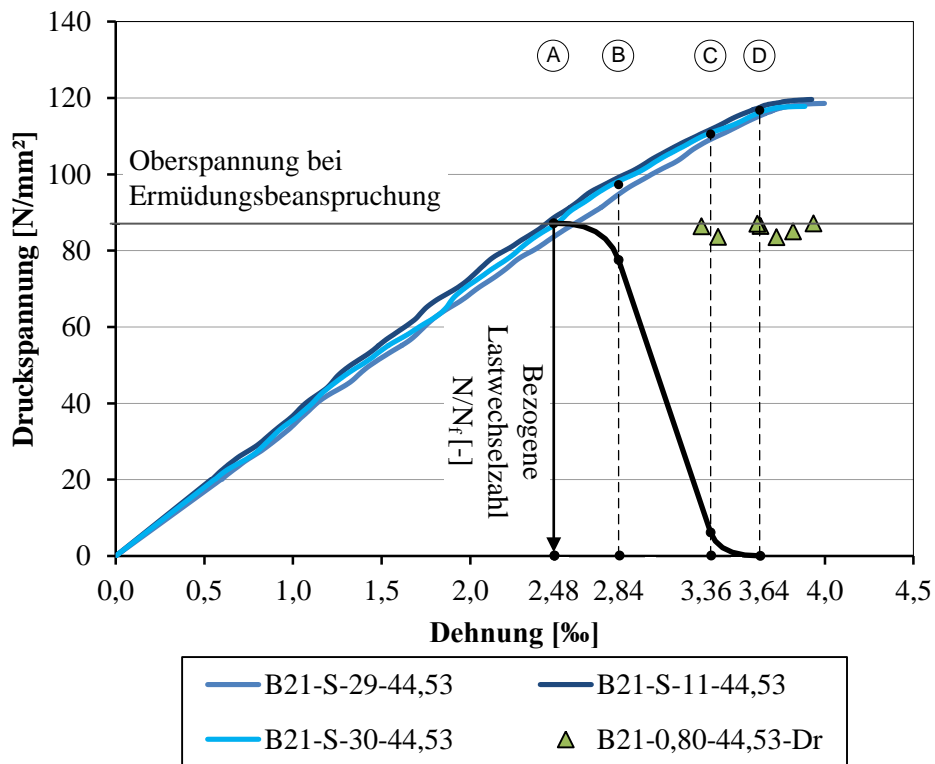


Abbildung 8.1: Vergleich des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung, B21, $S_0 = 0,80$, $\dot{k} = 44,53 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$

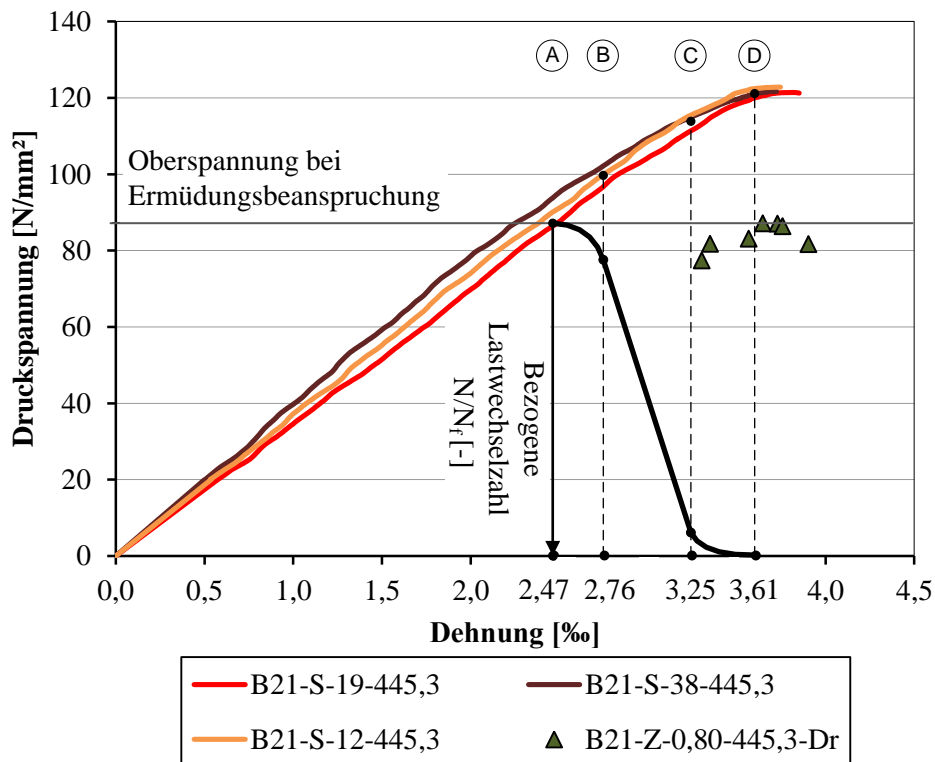


Abbildung 8.2: Vergleich des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung, B21, $S_0 = 0,80$, $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$

In Abbildung 8.1 und Abbildung 8.2 scheint es so, dass Punkt C auf der Spannungs-Dehnungslinie mit einer Änderung der Krümmung zusammenfällt. Dies kann jedoch nicht für die Dehnungsentwicklungen aller Versuchsserien bestätigt werden (vgl. auch Anhang A-5.1, Abbildung A 5.1 und A 5.2).

Das Versagen tritt im Ermüdungsversuch nicht nur bei Oberspannung, sondern auch im Bereich vor und nach dem Erreichen der Oberspannung auf, weshalb die eingezeichneten Bruchdehnungen zu unterschiedlichen Spannungen gehören. Die Einzelwerte der zyklischen Bruchdehnung sind jeweils fast ausschließlich kleiner, als die Bruchdehnungen in den zugehörigen Versuchen mit monoton steigender Beanspruchung. Der Mittelwert der Bruchdehnungen infolge zyklischer Beanspruchung ist jeweils immer kleiner als die Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung.

In Abbildung 8.1 und Abbildung 8.2 erscheint es so, als dass die mittlere zyklische Bruchdehnung einer Dehnung entspricht, ab der bei monoton steigender Beanspruchung eine deutlich stärkere Dehnungszunahme einsetzt (Punkt D). Die Vergleiche der Dehnungsentwicklungen der Chargen B22 und B23 bestätigen diesen mutmaßlichen Zusammenhang jedoch nicht (Abbildung 8.3 und Abbildung 8.4 bzw. Anhang A-5.1, Abbildung A 5.1 und A 5.2).

Die Vergleiche in Abbildung 8.1 und Abbildung 8.2 (bzw. Abbildung A 5.1 und A 5.2) unterscheiden sich in den betrachteten Belastungsgeschwindigkeiten der zyklischen Versuche. Die bezogenen Oberspannungen der betrachteten zyklischen Versuche sind gleich. Die Vergleiche in Abbildung 8.3 und Abbildung 8.4 unterscheiden sich dagegen in den bezogenen Oberspannungen der zyklischen Versuche. Hier sind die Belastungsgeschwindigkeiten gleich. In Abbildung 8.3 und Abbildung 8.4 sind die Dehnungsverläufe infolge monoton steigender und zyklischer Beanspruchung der Versuche der Charge B23 dargestellt. Diese beiden Abbildungen enthalten aufgrund gleicher Belastungsgeschwindigkeiten jeweils die gleichen Spannungs-Dehnungslinien (monoton steigend), aber aufgrund der unterschiedlichen Oberspannungsniveaus $S_O = 0,80$ und $S_O = 0,90$, unterschiedliche zyklische Dehnungsentwicklungen.

Auch diese Vergleiche der Dehnungsverläufe infolge monoton steigender und zyklischer Beanspruchung lassen keine Zusammenhänge der Dehnungen an markanten „Zeitpunkten“ erkennen (Punkte A – C). Werden Abbildung 8.3 und Abbildung 8.4 miteinander verglichen, so zeigt sich, dass die Anfangsdehnung unter Ermüdungsbeanspruchung infolge der höheren bezogenen Oberspannung deutlich ansteigt. Auch die Dehnungen an den Phasenübergängen sind für $S_O = 0,90$ größer (vgl. auch Abschnitt 6.5.8), sodass sich die Punkte B und C nach rechts verschieben.

Werden die Bruchdehnungen infolge zyklischer und monoton steigender Beanspruchung verglichen, so sind die Einzelwerte, und dementsprechend auch der jeweilige Mittelwert, der Bruchdehnungen infolge zyklischer Beanspruchung bei beiden Oberspannungsniveaus kleiner als die Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung.

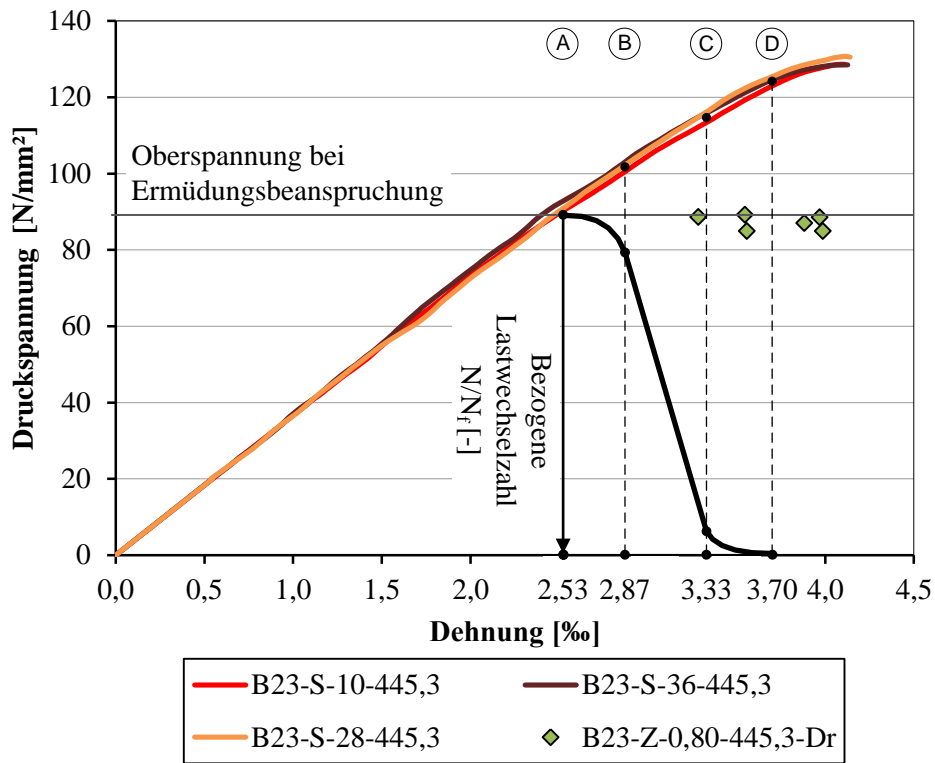


Abbildung 8.3: Vergleich des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung, B23, $S_0 = 0,80$, $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$

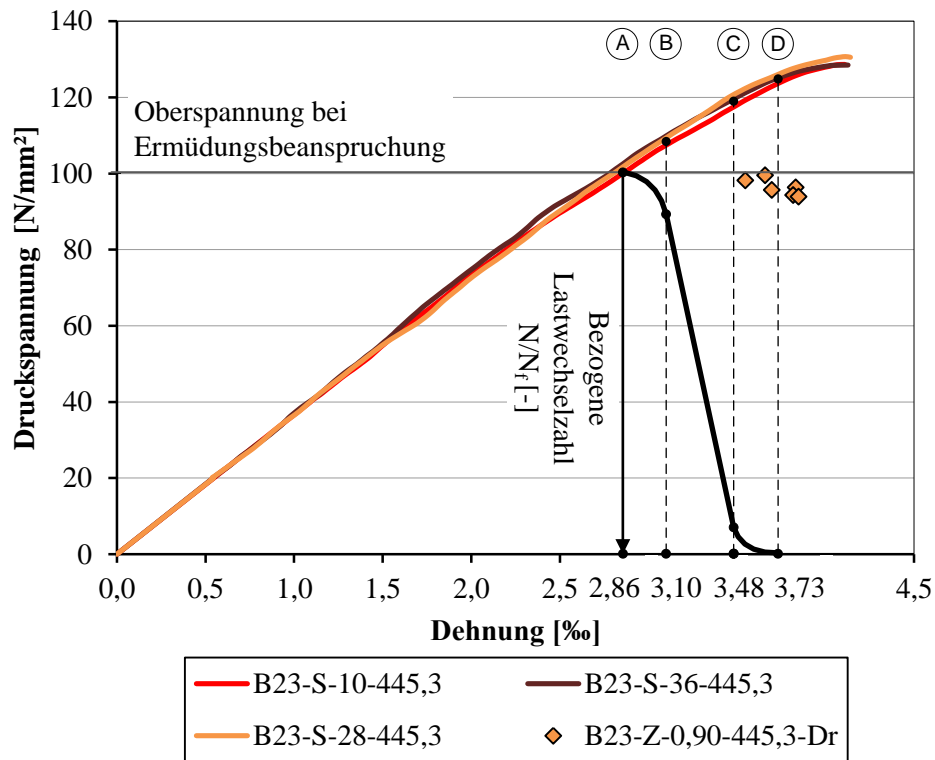


Abbildung 8.4: Vergleich des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung, B23, $S_0 = 0,90$, $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$

Die Auswertungen verdeutlichen, dass aufgrund der Beeinflussung der zyklischen Dehnungsentwicklungen durch die Oberspannung (vgl. Abschnitt 6.5.5), die jedoch nicht durch die Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung abgebildet werden kann, keine allgemeingültigen Zusammenhänge zwischen den Dehnungsentwicklungen und den Spannungs-Dehnungslinien ableitbar sind. Diese Feststellung gilt in Bezug auf alle Einflüsse auf die zyklischen Dehnungsentwicklungen, die nicht durch die Spannungs-Dehnungslinie wiedergespiegelt werden können, d. h. auch in Bezug auf den Einfluss der Wellenform.

8.2.4 Betrachtung der Bruchdehnungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Ansatz verfolgt, Spannungs-Dehnungslinien infolge monoton steigender Beanspruchung und Dehnungsentwicklungen infolge zyklischer Beanspruchungen bei gleicher Regelungsart, d. h. Kraftregelung, und gleicher Belastungsgeschwindigkeit miteinander zu vergleichen. Dieses Vorgehen wurde u. a. gewählt unter Berücksichtigung der Tatsache, dass für den hochfesten Beton im weggeregelten Versuch mit monoton steigender Beanspruchung kein abfallender Ast der Spannungs-Dehnungslinie ermittelt werden konnte (vgl. Abschnitt 5.3).

Für kraftgeregelte Versuche mit monoton steigender und zyklischer Beanspruchung lässt sich das Envelope-Konzept wie in Abbildung 8.5 schematisch dargestellt beschreiben. Aufgrund der im Allgemeinen konstanten Oberlast bei kraftgeregelt durchgeführten zyklischen Versuchen reduziert sich das Envelope-Konzept in diesem Fall auf die Frage, ob die zyklischen Bruchdehnungen kleiner sind als die Bruchdehnungen bei monoton steigender Beanspruchung.

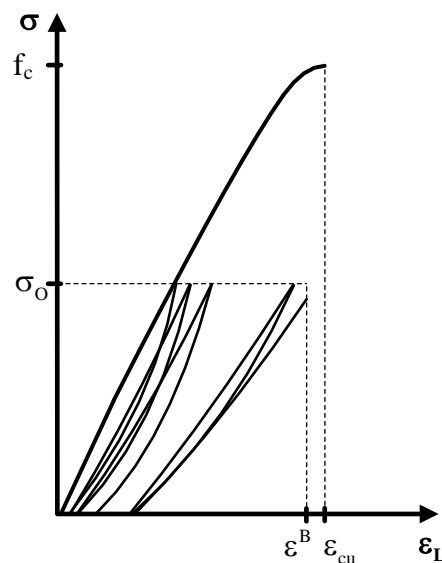


Abbildung 8.5: Schematische Darstellung des Envelope-Konzepts bei kraft geregelter monoton steigender und zyklischer Belastung

Die Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung wurden in kraftgeregelten Versuchen mit hohen Belastungsgeschwindigkeiten ermittelt. Diese Bruchdehnungen sind deutlich größer als die in den weggeregelten Referenzversuchen ermittelten Bruchdehnungen (vgl. Anhang A-2.2, Tabelle A 2.1). Die Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung werden im Folgenden mit den zyklischen Bruchdehnungen verglichen, die bei gleicher Belastungsgeschwindigkeit, aber für zwei Oberspannungsniveaus ermittelt wurden. Hierzu wurden die Bruchdehnungen infolge monoton steigender und zyklischer Beanspruchung statistisch analysiert.

Aufgrund des jeweils sehr kleinen Stichprobenumfangs der Versuche mit monotoner Laststeigerung ($n = 3$) wurde bei dieser statistischen Auswertung ein anderes Vorgehen gewählt als bei den Auswertungen in Abschnitt 6.5. Anstatt Signifikanztests durchzuführen, wurden jeweils die Wahrscheinlichkeiten dafür bestimmt, dass die Einzelwerte der Bruchdehnungen infolge zyklischer Beanspruchung den Mittelwert der Bruchdehnung infolge monoton steigender Beanspruchung unterschreiten. Ausgewertet wurden Versuchsserien mit jeweils gleicher Belastungsgeschwindigkeit. Die Wahrscheinlichkeiten sind im Anhang A-5.1, Tabelle A 5.1 zusammengestellt.

Die Wahrscheinlichkeiten für das Unterschreiten des Mittelwerts der Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung liegen zwischen 70 % und 100 %. Mit großer Wahrscheinlichkeit sind die Bruchdehnungen infolge zyklischer Beanspruchung also kleiner als die Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung, was die von [Kono et al. – 2008] für niedrigere Belastungsgeschwindigkeiten ermittelten Ergebnisse bestätigt.

Werden abweichend von dem hier gewählten Ansatz statt der Bruchdehnungen infolge monotoner Laststeigerung mit erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten die Bruchdehnungen aus den weggeregelten Referenzversuchen für den Vergleich herangezogen, so zeigt sich, dass die zyklischen Bruchdehnungen ebenfalls zum überwiegenden Teil im Mittel kleiner oder ähnlich groß wie die Bruchdehnungen der Referenzversuche sind (vgl. Anhang A-2.2, Tabelle A 2.1). Wäre ferner die Ermittlung eines abfallenden Astes in den weggeregelten Versuchen möglich gewesen, so wären die Bruchdehnungen aus den Referenzversuchen noch größer gewesen und somit noch deutlicher von den Bruchdehnungen infolge zyklischer Beanspruchung unterschritten worden.

Das Envelope-Konzept kann somit für hochfeste Betone, kraftgesteuert aufgebrachte zyklische und monoton steigende Beanspruchungen und die untersuchten hohen zyklischen Beanspruchungsniveaus bestätigt werden. Im Hinblick auf das Schädigungsmodell nach [Pfanner – 2003] und die zugrunde liegende „Schädigungshypothese“ bedeuten kleinere zyklische Bruchdehnungen als Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung, dass für zyklische und monoton steigende Beanspruchungen kein Zustand gleicher, in Schädigung dissipierter Energie erreicht werden kann. Das energiebasierte Schädigungsmodell nach

[Pfanner – 2003] ist somit für hochfeste Betone und kraftgeregelte Druckschwellbeanspruchungen mit hohen Beanspruchungsniveaus nicht gültig.

8.2.5 Zusammenfassung und Beurteilung

Es wurden die Spannungs-Dehnungslinien infolge monoton steigender Beanspruchung mit den Dehnungsentwicklungen bei Oberspannung infolge zyklischer Beanspruchung verglichen, die bei gleicher Regelungsart und gleichen Belastungsgeschwindigkeiten ermittelt wurden. Anhand der Anfangsdehnungen konnte zunächst gezeigt werden, dass dieses Vorgehen sinnvoll und zielführend ist.

Vielmehr zeigte sich jedoch, dass allgemeingültige Zusammenhänge zwischen den Phasen der zyklischen Dehnungsentwicklung und dem Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie, wie in [Hohberg – 2004] dargestellt, nicht existieren können. Dieses ist auf die in Abschnitt 6.5. festgestellten Beeinflussungen der zyklischen Dehnungsentwicklungen durch die zyklischen Belastungsparameter zurückzuführen, die durch die Spannungs-Dehnungslinien infolge monoton steigender Beanspruchung nicht vollständig wiedergespiegelt werden können. So werden die Spannungs-Dehnungslinien, anders als die zyklischen Dehnungsentwicklungen, nur durch die Belastungsgeschwindigkeit beeinflusst. Insofern ist auch die Ableitung eines „verformungsbasierten Versagenskriteriums“ anhand der Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung, wie von [Balázs – 1994] für Verbundschlupf postuliert wurde, für Betone nicht allgemeingültig möglich.

Das Ergebnis, dass Zusammenhänge zwischen der Spannungs-Dehnungslinie infolge monoton steigender Beanspruchung und der Dehnungsentwicklung infolge zyklischer Beanspruchung nicht allgemeingültig ableitbar sind, ist grundsätzlich auch auf normalfeste Betone übertragbar.

Die Bruchdehnungen infolge zyklischer Beanspruchung sind kleiner als die Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung. Insofern kann das Envelope-Konzept für den hochfesten Beton, kraftgeregelte Versuchsdurchführung und die untersuchten hohen bezogenen Oberspannungen bestätigt werden. Im Hinblick auf das Schädigungsmodell nach [Pfanner – 2003] bedeutet dies, dass ein Zustand gleicher, in Schädigung dissipierter Energie nicht erreicht werden kann.

[Pfanner – 2003] entwickelte sein Schädigungsmodell jedoch mit Blick auf weggeregelte Versuche mit monoton steigender Beanspruchung und kraftgeregelte zyklische Versuche. Insofern kann argumentiert werden, dass die zyklischen Bruchdehnungen mit Spannungs-Dehnungslinien mit abfallendem Ast hätten verglichen werden müssen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass ein solcher abfallender Ast, insbesondere auch bei den hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten, auf denen der Fokus dieser Arbeit lag, für den hochfesten Beton nicht ermittelbar gewesen wäre. Wäre in solchen Versuchen abfallende Äste der Spannungs-Dehnungslinien ermittelbar, wären dabei auf jeden Fall noch größere Bruchdehnungen zu

erwarten gewesen als in den hier ausgewerteten kraftgeregelten Versuchen. Somit wäre die „Schädigungshypothese“ nach [Pfanner – 2003] in einem solchen Fall noch deutlicher verfehlt worden.

Die vorangegangenen Ausführungen machen deutlich, dass die entscheidende Frage bei der vergleichenden Betrachtung von Spannungs-Dehnungslinien infolge monoton steigender Beanspruchung und Dehnungsentwicklungen infolge zyklischer Beanspruchung ist, bei welchen Regelungsarten und Belastungsgeschwindigkeiten diese ermittelt werden sollten.

8.3 Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung

8.3.1 Einordnung

Die Dehnungsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung und hoher Dauerstandbeanspruchung zeigen jeweils einen dreiphasigen, s-förmigen Verlauf (Abschnitt 6.5 und Kapitel 7). Es sind daher in der Literatur Bestrebungen dokumentiert, Zusammenhänge zwischen beiden Beanspruchungsarten herzustellen (vgl. Abschnitt 2.4.2). Entsprechende Anknüpfungspunkte könnten für die Entwicklung von Modellen genutzt werden. Zusätzlich können aus dem Vergleich der Dehnungsentwicklungen Hinweise auf ähnliche oder unterschiedliche Gefügezustände, z. B. an markanten „Zeitpunkten“ der zyklischen Dehnungsentwicklung, abgeleitet werden, die zum besseren Verständnis des Ermüdungsverhaltens von Betonen beitragen könnten.

In der Literatur sind verschiedene Untersuchungen an normalfesten Betonen dokumentiert, in denen das Dehnungsverhalten bei zyklischer Beanspruchung im Zusammenhang mit dem bei Dauerstandbeanspruchung betrachtet wird (vgl. Abschnitt 2.4.1). Diese Untersuchungen unterscheiden sich je nach Zielsetzung in den verglichenen Beanspruchungsniveaus. Hierbei sind teilweise widersprüchliche Ergebnisse hinsichtlich der Relation der Dehnungsentwicklungen dokumentiert. Nur geringe Unterschiede der Höhe der Dehnungen bei gleichem Beanspruchungsniveau und nach gleicher Belastungsdauer stellten [Mehmel / Kern – 1962] fest. [Weigler / Rings – 1987] sahen ähnliche Steigungen in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung. Dagegen sind in [Whaley / Neville – 1973] deutliche Unterschiede der Dehnungsentwicklungen dokumentiert. [Awad / Hilsdorf – 1971] zeigten, dass die Bruchdehnungen bei Dauerstandbeanspruchung größer sind als bei zyklischer Beanspruchung. Für hochfeste Betone sind in der Literatur keine Untersuchungsergebnisse dokumentiert.

Die Auswertung der eigenen Ermüdungsversuche (vgl. Abschnitt 6.5) zeigte bereits, dass die zyklischen Dehnungsentwicklungen durch die bezogene Oberspannung, die Belastungsfrequenz und die Wellenform beeinflusst werden. Die bisherigen vergleichenden Untersuchun-

gen aus der Literatur berücksichtigten diese Einflüsse kaum oder gar nicht. Für den hochfesten Beton werden im Folgenden die Dehnungsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung im Zusammenhang mit dem zeitabhängigen Dehnungsverhalten bei Dauerstandbeanspruchung untersucht. Hierzu werden die Dehnungsentwicklungen kraft geregelter Dauerstandversuche und kraft geregelter zyklischer Versuche bei zwei Oberspannungsniveaus und zwei Belastungsfrequenzen miteinander verglichen.

Ziel der folgenden Auswertungen ist die Untersuchung möglicher Zusammenhänge der Dehnungsentwicklungen beider Beanspruchungsarten. Hierzu werden zunächst die Relationen der Dehnungsentwicklungen betrachtet, um zu untersuchen, ob die Dehnungsentwicklungen unter Ermüdungsbeanspruchung in Anlehnung an die Dehnungsentwicklungen unter Dauerstandbeanspruchung beschrieben werden können (Frage F9, Abschnitt 3.3). Darüber hinaus sollen die Dehnungen an den Phasenübergängen vergleichend und im Hinblick auf ähnliche Gefügestände betrachtet werden (Frage F10, Abschnitt 3.3). Im Hinblick auf die Beurteilung der Hypothesen aus der Literatur (vgl. Abschnitt 3.4) soll untersucht werden, inwieweit es Hinweise auf eine unterschiedliche Beeinflussung der Dehnungsentwicklungen durch zeitliche Effekte gibt.

8.3.2 Vorbemerkungen zum Vergleich der Dehnungsentwicklungen

Die Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung ist Ergebnis einer Beanspruchung mit konstanter Beanspruchungshöhe. Die Dehnungen treten in zeitlich unmittelbarer Abfolge auf. Dagegen entspricht die zyklische Dehnungsentwicklung einer Aneinanderreihung von Dehnungspeaks. Zwischen diesen Peaks finden Ent- und Wiederbelastungen statt. Die Dehnungsentwicklungen beider Beanspruchungsarten können bei gleicher Beanspruchungshöhe verglichen werden. Hierin besteht ein wesentlicher Unterschied zu dem zuvor beschriebenen Vergleich zwischen Ermüdungsversuchen und Versuchen mit monoton steigender Beanspruchung.

Für die vergleichenden Auswertungen werden die zyklischen Versuche mit dreiecksförmiger Wellenform herangezogen, die auch in den in Abschnitt 8.2 dargestellten Auswertungen verwendet wurden. Die zyklischen Dehnungsentwicklungen werden dabei über die Belastungsdauer und nicht wie bei den Auswertungen in Abschnitt 6.5 über die Lastwechselzahl ausgewertet. Wie bereits zuvor in Abschnitt 6.4.3 erläutert wurde, wird die Bruchlastwechselzahl bei Erhöhung der Belastungsfrequenz nicht um das gleiche Maß vergrößert wie die Belastungsdauer verkleinert wird. Als Folge ist das Verhältnis der über die Belastungsdauer ausgewerteten Steigungen bei verschiedenen Frequenzen anders als das Verhältnis der über die Lastwechselzahl ausgewerteten Steigungen bei verschiedenen Frequenzen (vgl. Abschnitt 6.5.2, Abbildung 6.16, Abbildung 6.15).

Für den Vergleich werden die zyklischen Dehnungsentwicklungen bei Oberspannung herangezogen. Die Dehnungsentwicklungen werden im Folgenden grafisch und zahlenmäßig ver-

glichen. Wie in Kapitel 7 beschrieben wurde, hat die unterschiedliche Geschwindigkeit der Laststeigerung bis zum Erreichen der Dauerstandbeanspruchung nur einen Effekt auf die Frühphase der Dehnungsentwicklung. Da dieser Effekt somit für die folgenden Vergleiche von untergeordneter Relevanz ist, wird bei den folgenden Betrachtungen keine Unterscheidung hinsichtlich der Belastungsgeschwindigkeiten bei Dauerstandbeanspruchung gemacht.

8.3.3 Kenngrößen der Dehnungsentwicklungen

In Anlehnung an das Vorgehen bei der Auswertung der zyklischen Versuche und der Dauerstandversuche werden auch hier im Folgenden Kenngrößen verwendet. Die verwendeten Kenngrößen entsprechen weitestgehend den in Abschnitt 6.5 und Kapitel 7 verwendeten Kenngrößen. Der tiefgestellte Index „i“ steht für die Art der Beanspruchung.

Allgemein:

$\Delta N^{I;II;III}$	[-]	Anzahl der Lastwechsel in den Phasen I, II bzw. III
N_f	[-]	Bruchlastwechselzahl
$\Delta t^{I;II;III}$	[s]	Dauer der Phasen I, II bzw. III
t_U	[s]	Belastungsdauer bis zum Versagen
I/II	[-]	Übergang von der ersten zur zweiten Phase
II/III	[-]	Übergang von der zweiten zur dritten Phase

Dehnungsentwicklung:

$\varepsilon_i^{0,0}$	[‰]	Anfangsdehnung beim Erreichen des Beanspruchungsniveaus bzw. im ersten Lastwechsel
ε_i^B	[‰]	Bruchdehnung beim Eintritt des Versagens
$\varepsilon_i^{I/II}, \varepsilon_i^{II/III}$	[‰]	Dehnung beim Übergang von Phase I zu Phase II bzw. von Phase II zu Phase III
$\Delta \varepsilon_i^{I;II;III,B}$	[‰] [%]	Dehnungszuwachs in Phase I, II bzw. III der Dehnungsentwicklung. Phase III beinhaltet die Bruchdehnung. Prozentual: Bezogen auf den Gesamtdehnungszuwachs
$\Delta \varepsilon_i^{I-III,B}$	[‰]	Gesamtdehnungszuwachs im Beanspruchungsprozess (inklusive der Bruchdehnung)

$\bar{\varepsilon}_{i,t}^{I;II;III}$	[s ⁻¹] Steigung der Dehnungsentwicklung in den verschiedenen Phasen bezogen auf die Dauer (t). Aufgrund des nichtlinearen Verlaufs der Dehnungsentwicklung in Phase I und III entspricht dieser Wert in diesen Phasen einer idealisierten Steigung.
	$\bar{\varepsilon}_{i,t}^{I;III} = \frac{\Delta\varepsilon_i^{I;III}}{\Delta t^{I;III}}; \bar{\varepsilon}_{D,t}^{II} = \text{Re g}(\varepsilon_D^{II}(t))$

Die verwendeten Kenngrößen sind in Abbildung 8.6 dargestellt.

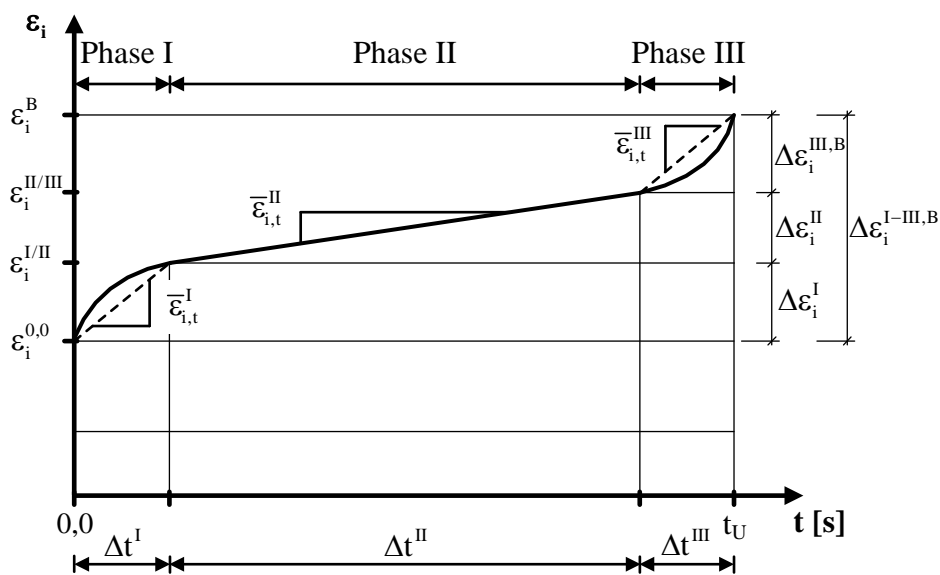


Abbildung 8.6: Verwendete Kenngrößen für den Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung

Bei den Dehnungsentwicklungen unter Dauerstandbeanspruchung besteht kein äquivalenter Wert zur oberen Enddehnung im letzten Lastwechsel von zyklischen Versuchen. Dementsprechend werden hier, anders als bei den Auswertungen der Dehnungsentwicklungen der zyklischen Versuche, nur die Bruchdehnungen verwendet. Die dritte Phase beinhaltet hier somit die Bruchdehnung (vgl. Abbildung 8.6).

8.3.4 Verlauf der Dehnungsentwicklungen

Für den Vergleich werden die Versuchsserien der Charge B23 (Block E4 und Block D1) herangezogen. Die zyklischen Versuche wurden bei dreiecksförmiger Belastung, zwei Beanspruchungsniveaus und zwei Belastungsgeschwindigkeiten durchgeführt. Folgende Versuchsserien zyklischer Versuche und Dauerstandversuche werden verwendet:

B23-Zykl-0,90-0,86/445,3-Dr	(Hier kurz: Zykl0,90/0,86)
B23-Zykl-0,80-0,98/445,3-Dr	(Hier kurz: Zykl0,80/0,98)
B23-Zykl-0,80-9,76/4453-Dr	(Hier kurz: Zykl0,80/9,76)
B23-Dauer-0,90	(Hier kurz: Dauer90)
B23-Dauer-0,80	(Hier kurz: Dauer80)

Wie bereits in Abschnitt 7.2 gezeigt wurde, ist eine Phaseneinteilung für die Dauerstandversuche ohne Versagen ($S_D = 0,80$) nicht gesichert möglich. Die folgenden Auswertungen fokussieren sich daher auf die Dauerstandbeanspruchung bei dem höheren Beanspruchungsniveau $S_D = 0,90$. Die Darstellungen für $S_D = 0,80$ sind im Anhang A-5.2 enthalten. Anhang A-5.2 enthält ergänzend die Darstellungen der verwendeten Dehnungsentwicklungen über der logarithmierten Belastungsdauer.

Grafischer Vergleich bei gleichen Beanspruchungsniveaus

In Abbildung 8.7 sind die Dehnungsentwicklungen der zyklischen Versuche mit einer Belastungsfrequenz von $f_p = 0,86$ Hz bzw. mit einer Belastungsgeschwindigkeit von $\dot{k} = 445,3$ kN · s⁻¹ denen der Dauerstandversuche bei gleichem Beanspruchungsniveau $S_O = S_D = 0,90$ gegenübergestellt.

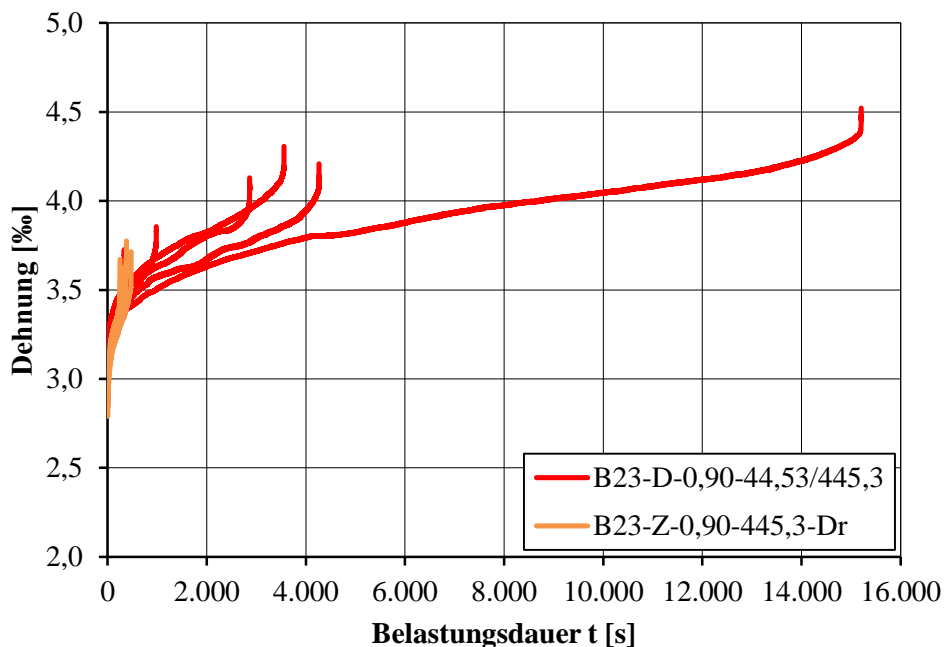


Abbildung 8.7: Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_O = 0,90$, $f_p = 0,86$ Hz, $\dot{k} = 445,3$ kN · s⁻¹ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,90$

Es ist zu sehen, dass die Belastungsdauer bis zum Versagen der zyklischen Versuche jeweils deutlich kürzer ist als bei Dauerstandbeanspruchung. Darüber hinaus ist erkennbar, dass die Steigungen in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung größer sind als bei Dauerstandbeanspruchung. Die Bruchdehnungen sind bei Dauerstandbeanspruchung größer als bei zyklischer Beanspruchung.

Es erscheint so, als dass die Be- und Entlastungsvorgänge den Verlauf der Dehnungsentwicklung bis zum Versagen gegenüber dem bei Dauerstandbeanspruchung beschleunigen würden. Insofern können die von [Whaley / Neville – 1973] für einen normalfesten Beton ermittelten Ergebnisse für den untersuchten hochfesten Beton bestätigt werden. Eine Verkleinerung der Belastungsfrequenz der zyklischen Beanspruchung und damit eine Veränderung in Richtung einer theoretisch unendlich kleinen Belastungsfrequenz bei Dauerstandbeanspruchung würde zu einer Verkleinerung der Steigungen führen (vgl. Abschnitt 6.5.8).

Grafischer Vergleich bei unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus

Die Dehnungsentwicklungen bei $S_D = 0,90$ werden im Folgenden mit den Dehnungsentwicklungen bei einem niedrigeren zyklischen Oberspannungsniveau verglichen. Zur Verfügung stehen zyklische Versuche mit $S_O = 0,80$, $f_p = 0,98$ Hz bzw. $\dot{k} = 445,3$ kN · s⁻¹. Die Belastungsgeschwindigkeit entspricht der Belastungsgeschwindigkeit der zyklischen Versuche im vorherigen Vergleich.

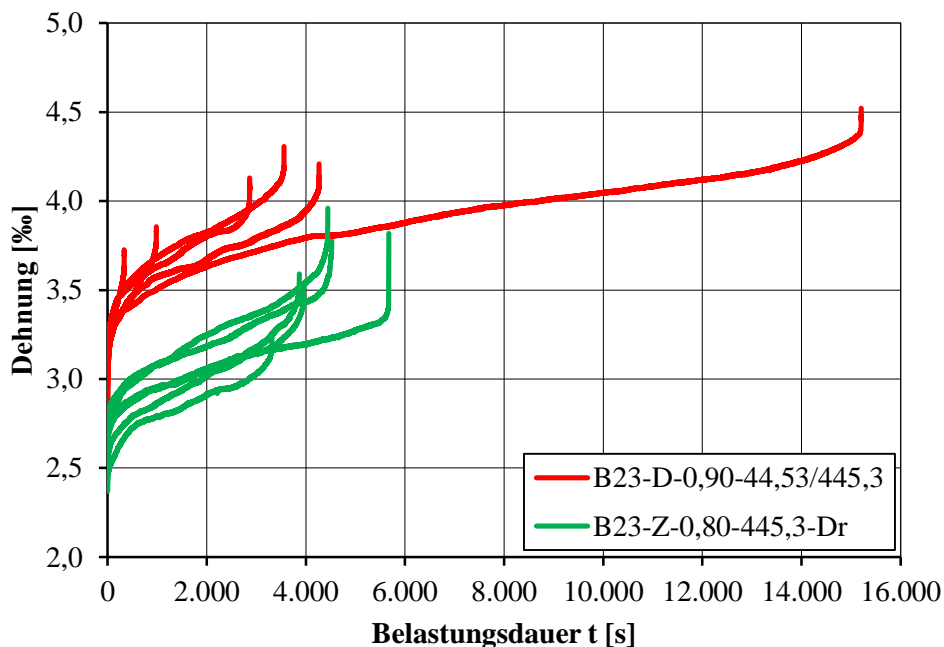


Abbildung 8.8: Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_O = 0,80$, $f_p = 0,98$ Hz, $\dot{k} = 445,3$ kN · s⁻¹ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,90$

In Abbildung 8.8 ist zu sehen, dass sich bei dieser zyklischen Beanspruchung ähnliche Steigungen in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung einstellen wie bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,90$. Auch die Belastungsdauern bis zum Versagen nähern sich an. Die Dehnungsentwicklungen verlaufen jedoch aufgrund der verschiedenen Beanspruchungsniveaus auf deutlich unterschiedlichen Dehnungsniveaus bzw. „Höhenlagen“ der Dehnung.

Grafischer Vergleich bei unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus und höherer Belastungsfrequenz

In Abbildung 8.9 sind die Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_O = 0,80$ und $f_p = 9,76$ Hz bzw. $\dot{k} = 4453$ kN·s⁻¹ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,90$ vergleichend dargestellt. Der Unterschied zu Abbildung 8.8 besteht also in der um Faktor 10 erhöhten Belastungsfrequenz der zyklischen Beanspruchung.

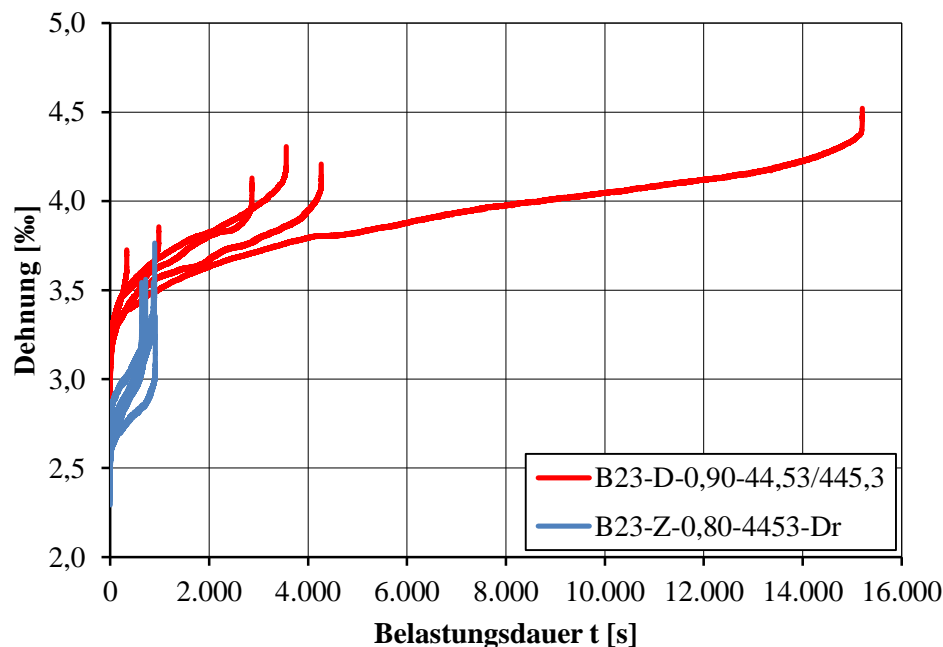


Abbildung 8.9: Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_O = 0,80$, $f_p = 9,76$ Hz, $\dot{k} = 4453$ kN·s⁻¹ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,90$

In Abbildung 8.9 ist zu sehen, dass die Steigungen der zyklischen Dehnungsentwicklungen bei höherer Belastungsfrequenz nun deutlich steiler sind als die der Dehnungsentwicklungen bei Dauerstandbeanspruchung. Das Dehnungsniveau ist zudem bei beiden Beanspruchungsarten unterschiedlich. Darüber hinaus ist der Unterschied der Belastungsdauern bis zum Versagen in diesem Vergleich wieder deutlicher ausgeprägt als bei dem Vergleich in Abbildung 8.8, bei niedrigerer (zyklischer) Belastungsfrequenz.

Vergleich der Dehnungsentwicklungen anhand der Kenngrößen

Ergänzend werden im Folgenden die Werte der Kenngrößen genauer analysiert. Die Werte der Kenngrößen sind als Mittelwerte der jeweiligen Versuchsserien in Tabelle 8.1 zusammengestellt. Der grafische Vergleich erfolgt mit Bezug zur Belastungsdauer t .

			A	B	C	D
Belastung			Dauerstand	Zykl., Dr	Zykl., Dr	Zykl., Dr
Beanspruchungsniveau			0,90	0,90	0,80	0,80
Belastungsfrequenz [Hz]			-	0,86	0,98	9,76
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]			-	445,3	445,3	4453
Charge			B23	B23	B23	B23
1	$\varepsilon_D^{0,0}, \varepsilon_O^{0,0}$	[‰]	2,92	2,86	2,53	2,39
2	$\varepsilon_D^{I/II}, \varepsilon_O^{I/II}$	[‰]	3,49	3,10	2,87	2,71
3	$\varepsilon_D^{II/III}, \varepsilon_O^{II/III}$	[‰]	3,89	3,48	3,33	3,14
4	$\Delta\varepsilon_D^I, \Delta\varepsilon_O^I$	[‰]	0,57	0,24	0,35	0,32
5	$\Delta\varepsilon_D^{II}, \Delta\varepsilon_O^{II}$	[‰]	0,40	0,38	0,46	0,44
6	$\Delta\varepsilon_D^{III,B}, \Delta\varepsilon_O^{III,B}$	[‰]	0,24	0,25	0,37	0,45
7	$\Delta\varepsilon_D^{I-III,B}, \Delta\varepsilon_O^{I-III,B}$	[‰]	1,21	0,88	1,18	1,21
8	$\Delta\varepsilon_D^I, \Delta\varepsilon_O^I$	[%]	46,8	28,3	30,1	26,2
9	$\Delta\varepsilon_D^{II}, \Delta\varepsilon_O^{II}$	[%]	33,7	44,6	38,9	36,6
10	$\Delta\varepsilon_D^{III,B}, \Delta\varepsilon_O^{III,B}$	[%]	19,5	27,1	30,8	37,1
11	$\bar{\varepsilon}_{D,t}^I, \bar{\varepsilon}_{O,t}^I$	[s ⁻¹]	$2,56 \cdot 10^{-6}$	$6,42 \cdot 10^{-6}$	$7,37 \cdot 10^{-7}$	$7,63 \cdot 10^{-6}$
12	$\bar{\varepsilon}_{D,t}^{II}, \bar{\varepsilon}_{O,t}^{II}$	[s ⁻¹]	$3,35 \cdot 10^{-7}$	$1,22 \cdot 10^{-6}$	$1,23 \cdot 10^{-7}$	$5,59 \cdot 10^{-7}$
13	$\bar{\varepsilon}_{D,t}^{III}, \bar{\varepsilon}_{O,t}^{III}$	[s ⁻¹]	$6,86 \cdot 10^{-6}$	$1,32 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-6}$	$9,18 \cdot 10^{-6}$
14	$\varepsilon_D^B, \varepsilon_O^B$	[‰]	4,13	3,73	3,71	3,60
15	N_f	[-]	-	314	4193	7860
16	t_U	[s]	4534	362	4296	805
17	Δt^I	[s]	842	39	486	42
18	Δt^{II}	[s]	3272	302	3360	714
19	Δt^{III}	[s]	420	23	268	50
20	I/II	[-]	0,16	0,11	0,11	0,05
21	II/III	[-]	0,93	0,94	0,94	0,94

Tabelle 8.1: Vergleich der Kenngrößen der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandsbeanspruchung (Mittelwerte)

Anhand von Tabelle 8.1 zeigt sich, dass die mittleren Anfangsdehnungen (Zeile 1) der Dauerstandversuche und zyklischen Versuche mit gleichen Beanspruchungsniveaus relativ gut übereinstimmen (Spalte A/B). Dagegen sind die anfänglichen Dehnungen bei Zykl80/0,98 und Zykl80/9,76 (Spalte C/D) aufgrund des niedrigeren Beanspruchungsniveaus kleiner.

Die Auswertungen der Ermüdungsversuche in Abschnitt 6.5 und die der Dauerstandversuche in Kapitel 7 haben bereits gezeigt, dass die Dehnungen an den Phasenübergängen von den jeweiligen Beanspruchungsparametern beeinflusst werden. Es ist somit zu erwarten, dass bei Ermüdungsbeanspruchung und Dauerstandbeanspruchung unterschiedlich große Dehnungen an den Phasenübergängen existieren.

Die Dehnungen an den Übergängen der Phasen I/II bzw. II/III sind als Einzelwerte in Abbildung 8.10 bzw. Abbildung 8.11 vergleichend über der logarithmierten Belastungsdauer am jeweiligen Phasenübergang dargestellt. Beim Vergleich der Dehnungen an den Phasenübergängen für die Versuche bei gleichem Beanspruchungsniveau $S_D = S_O = 0,90$ zeigt sich, dass die Streuungen der Dehnungen bei Dauerstandbeanspruchung deutlich größer sind. Die mittlere Dehnung an den Phasenübergängen bei Dauerstandbeanspruchung ist um ca. 0,4 % größer als die mittlere Dehnung bei zyklischer Beanspruchung mit $S_O = 0,90$ und das, obwohl die Anfangsdehnungen annähernd gleich sind (Tabelle 8.1). Die unterschiedliche Größe der Dehnungen an den Phasenübergängen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung gleicher Höhe könnte auf unterschiedliche Gefügestandards bzw. Mikrorisszustände hinweisen. Wie bereits zuvor erwähnt, sind die Dehnungen bei zyklischer Beanspruchung jedoch möglicherweise durch den Belastungsvorgang beeinflusst.

Der Gesamtzuwachs der Dehnung ist bei Dauer90, Zykl80/0,98 und Zykl80/9,76 ähnlich groß, wobei die Anfangsdehnung bei Dauer90 deutlich größer ist (Tabelle 8.1, Zeile 7). Für Zykl90/0,86 ist der Gesamtdehnungszuwachs kleiner. Die Bruchdehnung ist dementsprechend bei Dauer90 deutlich größer als bei den zyklischen Belastungen (Zeile 14), was die Erkenntnisse von [Awad/Hilsdorf – 1971] bestätigt. Die idealisierten Steigungen der ersten und dritten Phase sowie die Steigung der zweiten Phase der Dehnungsentwicklungen sind bei Zykl90/0,86 und Zykl80/9,76 größer als bei Dauer90 und bei Zykl80/0,98 (Zeilen 11-13).

Die Belastungsdauer ist bei Dauer90 im Mittel am längsten (4534 s). Etwas kürzer ist die Belastungsdauer für Zykl80/0,98 (4296 s) (Zeile 16). Trotz ähnlicher Belastungsdauern hat Zykl80/0,98 deutlich kürzere Phasen I und III (Zeile 17/19). Phase II ist dagegen bei Dauer90 und Zykl80/0,98 ähnlich lang (Zeile 18).

Prozentual betrachtet, treten bei Dauer90 47 % des Gesamtdehnungszuwachses in der ersten Phase auf (Zeile 8). Von der zweiten zur dritten Phase nimmt der prozentuale Anteil ab (Zeile 9/10). In der dritten Phase treten bei Dauer90 nur 20 % des Gesamtdehnungszuwachses auf. Damit ist die Verteilung des Dehnungszuwachses auf die einzelnen Phasen bei Dauerstandbeanspruchung anders als bei den zyklischen Beanspruchungen. Dauer90 zeigt anteilig zur Ge-

samtbelastungsdauer den spätesten Übergang von Phasen I zu II (Zeile 20). Der Übergang von Phase II zu Phase III ist dagegen bei allen vier Versuchsserien bei einem annähernd gleichen bezogenen Zeitpunkt von $t/t_U = 0,93$ zu verzeichnen (Zeile 21).

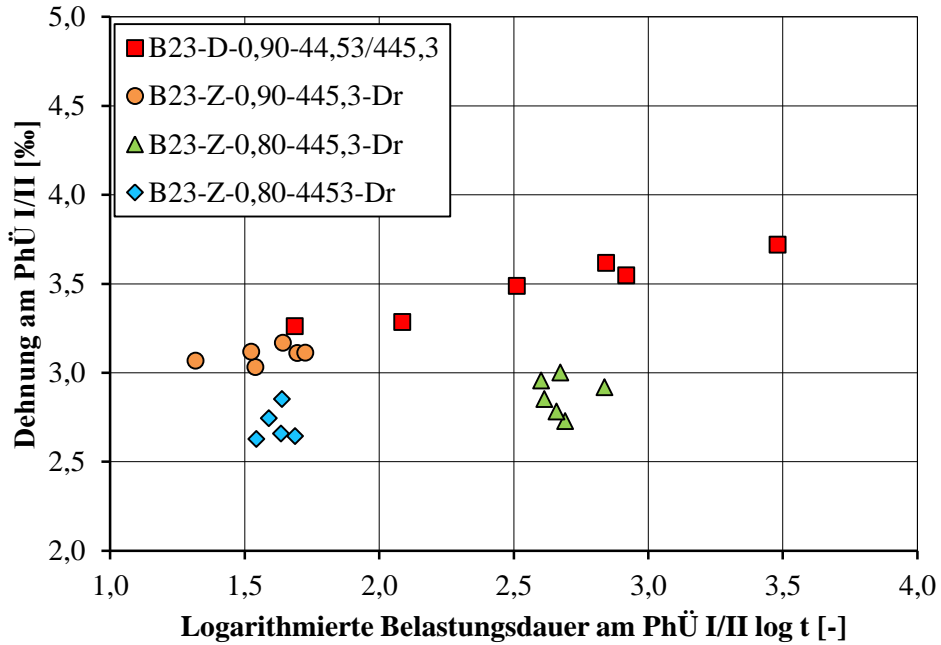


Abbildung 8.10: Dehnung infolge Ermüdungs- und Dauerstandbeanspruchung am Phasenübergang I/II (Einzelwerte)

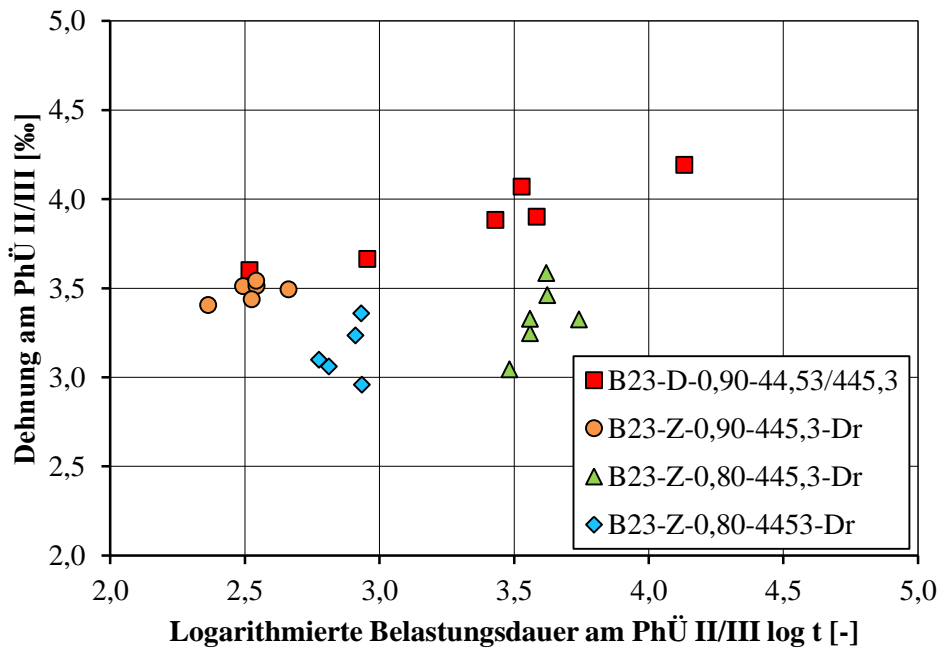


Abbildung 8.11: Dehnung infolge Ermüdungs- und Dauerstandbeanspruchung am Phasenübergang II/III (Einzelwerte)

8.3.5 Systematische Zusammenhänge

In Abschnitt 6.5 und Kapitel 7 wurde jeweils für zyklische Beanspruchungen und Dauerstandbeanspruchungen festgestellt, dass sich in doppellogarithmischer Darstellung ein linearer Zusammenhang zwischen der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der Belastungsdauer bis zum Versagen ergibt. In Abbildung 8.12 sind die logarithmierten Steigungen der Dehnungsentwicklungen in der zweiten Phase über die logarithmierten Belastungsdauern bis zum Versagen für beide Beanspruchungsarten gemeinsam dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Werte der Dauerstandversuche und der zyklischen Versuche gemeinsam durch folgende Gerade approximiert werden können:

$$\log t_U = -1,078 \cdot \log \bar{\epsilon}_{i,t}^{\text{II}} - 3,839 \quad r^2 = 0,980 \quad n = 23 \quad (8.1)$$

Auffällig ist auch hier, dass der Streubereich der Dauerstandversuche hinsichtlich der Belastungsdauer und hinsichtlich der Steigung deutlich größer ist als der Streubereich der zyklischen Vergleichsversuche mit $S_O = S_D = 0,90$ und als der Streubereich aller zyklischen Versuche der gleichen Charge. Die für die logarithmierten Steigungen und logarithmierten Belastungsdauern ermittelten Standardabweichungen bestätigen dieses graphische Ergebnis sehr deutlich (vgl. Anhang A-5.2, Tabelle A 5.2). Die Ursache für die Streuungen bei Dauerstandbeanspruchung kann nur die Streuung der tatsächlichen Beanspruchungshöhe und damit die Streuung der Druckfestigkeit sein, da diese der einzige für die Gesamtdehnungsentwicklung relevante Belastungsparameter ist (vgl. auch Kapitel 7).

In Abbildung 8.13 sind die Bruchdehnungen infolge zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Dauerstandbeanspruchung bei gleicher Belastungsdauer fast ausschließlich zu größeren Bruchdehnungen führt als die zyklischen Beanspruchungen. Werden die Ergebnisse der zyklischen Versuche und die der Dauerstandversuche bei gleichem Beanspruchungsniveau $S_O = S_D = 0,90$ betrachtet, so zeigt sich, dass auch die Bruchdehnungen der Dauerstandversuche deutlich größere Streuungen zeigen als die zyklischen Vergleichsversuche.

Gleichzeitig zeigen die Bruchdehnungen infolge Dauerstandbeanspruchung einen deutlicheren Zusammenhang zur Belastungsdauer. Darüber hinaus ist zu sehen, dass sich zwischen der Bruchdehnung und der Belastungsdauer bis zum Versagen kein von der Beanspruchungsart unabhängiger Zusammenhang ableiten lässt. Auch hier kann die Ursache für die Streuungen bei Dauerstandbeanspruchung nur die Streuung der tatsächlichen Beanspruchungshöhe und damit die Streuung der Druckfestigkeit des Betons sein.

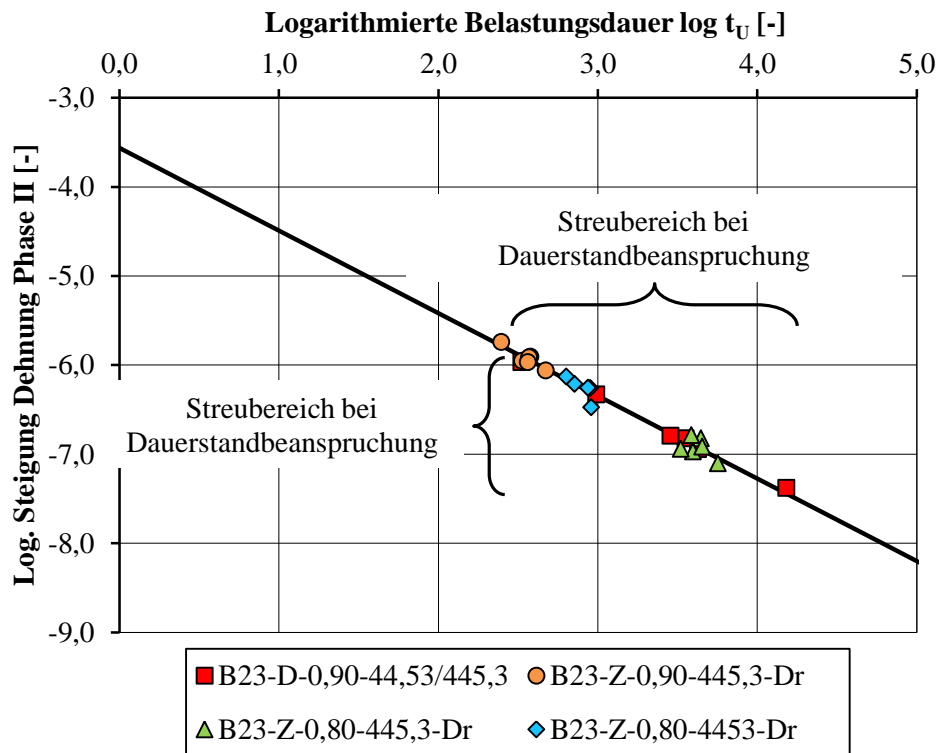


Abbildung 8.12: Logarithmierte Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen (Einzelwerte)

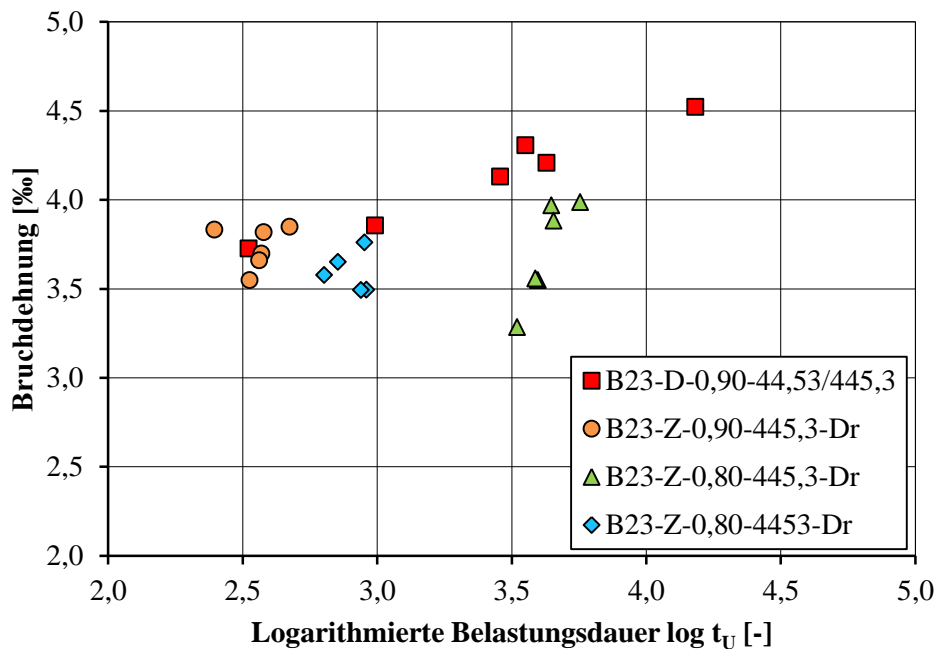


Abbildung 8.13: Bruchdehnungen der Dauerstandversuche und der zyklischen Versuche dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen (Einzelwerte)

Die materialbedingten Streuungen der tatsächlichen Beanspruchungsniveaus bei den verschiedenen Versuchsserien mit zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung können als annähernd gleich angenommen werden, da die verwendeten Proben einer Charge entstammen. Die deutlich größeren Streubereiche der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase, der Dehnung an den Phasenübergängen, der Bruchdehnung und der Belastungsdauer der Dauerstandversuche zeigen somit den stärkeren Einfluss der Beanspruchungshöhe auf die Dehnungsentwicklungen im Vergleich zu den zyklischen Versuchen. Dieses kann auf die bei gleicher Belastungsdauer kürzere Wirkungsdauer hoher Beanspruchung bei zyklischer Beanspruchung zurückgeführt werden. Der Effekt der Beanspruchungshöhe bzw. der zeitliche Effekt ist somit bei zyklischen Beanspruchungen weniger stark ausgeprägt. Gleichzeitig wird hierdurch indirekt die Bedeutung der Be- und Entlastungsvorgänge für das Materialverhalten bei zyklischer Beanspruchung deutlich.

8.3.6 Zusammenfassung und Beurteilung

Es wurden die Dehnungsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung und Dauerstandbeanspruchung bei gleichen und unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus für ausgewählte Belastungsfrequenzen miteinander verglichen. Die durchgeführten vergleichenden Auswertungen zeigen insgesamt, dass sich die Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung in Abhängigkeit von den Belastungsparametern unterschiedlich einstellen. Dabei besitzt die Dauerstandbeanspruchung nur die Beanspruchungshöhe als Belastungsparameter während die zyklische Beanspruchung durch mindestens drei Belastungsparameter charakterisiert wird.

Die Belastungsfrequenz beeinflusst wie schnell die Dehnungsentwicklung durchlaufen wird. Die Oberspannung beeinflusst ebenfalls den gesamten Verlauf der Dehnungsentwicklung aber zusätzlich auch das Dehnungsniveau auf dem die Dehnungsentwicklung stattfindet. Bei gleichem Oberspannungsniveau und Beanspruchungsniveau ist der Dehnungszuwachs pro Zeiteinheit bei zyklischer Beanspruchung in Abhängigkeit der Belastungsfrequenz größer als bei Dauerstandbeanspruchung. Um einen ähnlichen Dehnungszuwachs zu erreichen, wäre die Belastungsfrequenz weiter zu reduzieren, bis dann der Übergang zur Dauerstandbeanspruchung vollzogen ist. Eine Verkleinerung des Oberspannungsniveaus verkleinert den Dehnungszuwachs pro Zeiteinheit zwar auch, gleichzeitig ist das Dehnungsniveau der Dehnungsentwicklung dann jedoch gleichzeitig kleiner.

Für beide Beanspruchungsarten besteht ein von der Belastungsart unabhängiger, linearer Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen. Die Bruchdehnungen sind bei Dauerstandbeanspruchung für gleiche Belastungsdauern in den meisten Fällen größer als die Bruchdehnungen infolge der betrachteten zyklischen Beanspruchungen. Ein von der Be-

lastungsart unabhängiger Zusammenhang zwischen Bruchdehnung und Belastungsdauer existiert nicht.

Der Vergleich der Streuungen der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase, der Dehnung an den Phasenübergängen, der Bruchdehnung und der Belastungsdauer bis zum Versagen zeigt, dass das Dehnungsverhalten bei Dauerstandbeanspruchung stärker vom tatsächlichen Beanspruchungsniveau beeinflusst wird als das Dehnungsverhalten bei zyklischer Beanspruchung. Dieses steht mit der bei gleicher Belastungsdauer kürzeren Wirkungsdauer hoher Beanspruchung bei zyklischer Beanspruchung in Zusammenhang. Es ist gleichzeitig ein weiterer Hinweis darauf, dass das Materialverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung neben der Beanspruchungshöhe deutlich von den Be- und Entlastungsvorgängen (und ihren Belastungsgeschwindigkeiten) geprägt wird. Bei zyklischer Beanspruchung wirken sich zeitliche Effekte weniger stark aus als bei Dauerstandbeanspruchung.

Die Dehnungen an den Phasenübergängen sind, wie auch die Bruchdehnungen, bei Dauerstandbeanspruchung größer als bei zyklischer Beanspruchung mit gleichem Beanspruchungsniveau. Der Vergleich der Dehnungen an den Phasenübergängen infolge Dauerstandbeanspruchung und zyklischer Beanspruchung verdeutlicht, dass das Eintreten der Phasenübergänge nicht mit dem Erreichen eines bestimmten Dehnungswertes in Zusammenhang steht. Die trotz gleicher Beanspruchungshöhe unterschiedlichen Dehnungen an den Phasenübergängen könnten Hinweise auf unterschiedliche Gefügestände an den Phasenübergängen darstellen.

8.4 Approximation des Frequenzeinflusses durch die Berücksichtigung der Druckfestigkeitssteigerung

8.4.1 Einordnung

Die für den untersuchten hochfesten Beton ermittelten Bruchlastwechselzahlen lassen sich im Wöhlerdiagramm nur frequenzweise durch Regressionen beschreiben (vgl. Abschnitt 6.4, Abbildung 6.6). [Sparks / Menzies – 1973] bzw. [Sparks – 1982] stellen für einen normalfesten Beton und dreiecksförmige Belastungen jedoch fest, dass sich die bei verschiedenen Belastungsfrequenzen ermittelten Bruchlastwechselzahlen im Wöhlerdiagramm durch eine gemeinsame Gerade approximieren lassen, wenn die zyklischen Beanspruchungsniveaus bezogen auf die erhöhten Druckfestigkeiten des Betons bei den erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten unter Ermüdungsbeanspruchung berechnet werden (vgl. Abschnitt 2.2.5).

Anhand der eigenen Untersuchungsergebnisse soll im Folgenden die Übertragbarkeit dieses Approximationsansatzes einerseits auf hochfeste Betone und andererseits auf sinusförmige zyklische Beanspruchungen überprüft werden (Frage F11, Abschnitt 3.3). Hierzu wurde be-

reits in Kapitel 5 die Druckfestigkeitssteigerung infolge der unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten beschrieben. Auch die Bruchlastwechselzahlen infolge unterschiedlicher Belastungsfrequenzen sind bereits bekannt (vgl. Abschnitt 6.4.3). In diesem Abschnitt werden diese Ergebnisse nun zusammenführend ausgewertet.

Aus dem im Folgenden betrachteten Approximationsansatz ist die „Geschwindigkeits-Druckfestigkeits-Hypothese“ abgeleitet worden (vgl. Abschnitt 3.2). Somit dienen die folgenden Untersuchungen auch als Grundlage für die Beurteilung dieser Hypothese (Kapitel 9).

8.4.2 Umgerechnete bezogene Beanspruchungsniveaus

Für die folgenden Auswertungen müssen die zyklischen Beanspruchungsniveaus unter Berücksichtigung der erhöhten Druckfestigkeiten umgerechnet werden. Die hierfür erforderlichen erhöhten Druckfestigkeiten wurden für die in den Ermüdungsversuchen vorhandenen Belastungsgeschwindigkeiten für jede Charge experimentell ermittelt (vgl. Kapitel 5). Hierbei zeigte sich, dass die Ergebnisse zwischen den einzelnen Chargen stark streuen.

Vorauswertungen haben zudem ergeben, dass die Berücksichtigung von über die Chargen gemittelten Druckfestigkeitssteigerungen keine befriedigenden Auswertungsergebnisse liefert. Zur Überprüfung eines möglichen Zusammenhangs zwischen Belastungsfrequenz und Druckfestigkeitssteigerung werden daher im Folgenden die für jede Charge experimentell ermittelten Werte der Druckfestigkeiten bei erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten \dot{k}_i verwendet (vgl. Anhang A-2.2, Tabelle A 2.1).

Des Weiteren werden im Folgenden nur die Versuche der Chargen B21 und B22 verwendet. Bei diesen Chargen wurden sowohl sinusförmige als auch dreiecksförmige Beanspruchungen bei gleichen Beanspruchungsniveaus und gleichen Belastungsfrequenzen untersucht. Somit ist eine unmittelbare Vergleichbarkeit hinsichtlich des Einflusses der Wellenform gewährleistet.

Die Beanspruchungsniveaus werden entsprechend den Ausführungen von [Sparks – 1982] nach folgenden Gleichungen umgerechnet:

$$S_{O,v} = S_O \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm,v}} \quad \text{umgerechnete bezogene Oberspannung} \quad (8.2)$$

$$S_{U,v} = S_U \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm,v}} \quad \text{umgerechnete bezogene Unterspannung} \quad (8.3)$$

Mit : f_{cm} Mittelwert der Druckfestigkeit aus den Referenzversuchen
bei $\dot{w} = 0,20 \text{ mm/min}$

$f_{cm,v}$ Mittelwert der Druckfestigkeit aus den Versuchen bei erhöhten
Belastungsgeschwindigkeiten \dot{k}_i

Die umgerechneten Beanspruchungsniveaus sind für die verschiedenen Versuchsserien zusammen mit den „normalen“ und „erhöhten“ Druckfestigkeiten sowie mit den zugehörigen Belastungsgeschwindigkeiten in Anhang A-5.3, Tabelle A 5.3 enthalten. Da die gewählte bezogene Unterspannung mit $S_U = 0,05$ bei den eigenen Untersuchungen niedrig war, entsprechen die umgerechneten Unterspannungsniveaus näherungsweise den ursprünglichen Unterspannungsniveaus $S_{U,v} \approx S_U$.

Stärkere Erhöhungen der Druckfestigkeit führen zu einer stärkeren Verkleinerung der bezogenen Spannungen. Gleichzeitig wirkt sich die gleiche Druckfestigkeitserhöhung bei der Umrechnung höherer Beanspruchungsniveaus etwas stärker aus als bei der Umrechnung niedrigerer Beanspruchungsniveaus. Bei den betrachteten Versuchen ist dieser Effekt wenig ausgeprägt, da zwei sich wenig unterscheidende Oberspannungsniveaus von $S_O = 0,90$ und $S_O = 0,80$ untersucht wurden. Insgesamt bewirkt die Umrechnung auf eine neue, höhere Bezugsfestigkeit somit nicht nur eine vertikale Verschiebung der Versuchswerte im Wöhlerdiagramm nach unten, sondern auch eine leichte Verringerung der Neigung der Regressionsgeraden.

8.4.3 Ermüdungsversuche mit dreiecksförmiger Beanspruchung

Die Ermüdungsversuche mit dreiecksförmiger Beanspruchung weisen abschnittsweise konstante Belastungsgeschwindigkeiten im Lastwechsel auf. Betrachtet werden die Versuche der Chargen B21 und B22 bei $f_p = 0,09 \text{ Hz} - 1,0 \text{ Hz}$, wobei die Versuche mit Frequenzen im Bereich $f_p = 0,1 \text{ Hz}$ und im Bereich $f_p = 1,0 \text{ Hz}$ jeweils zusammengefasst betrachtet werden.

In Abbildung 8.14 sind die Einzelwerte der Bruchlastwechselzahlen zum einen in Bezug zu den ursprünglichen bezogenen Oberspannungen und zum anderen in Bezug zu den umgerechneten bezogenen Oberspannungen dargestellt. Für beide Belastungsfrequenzen ist jeweils eine Regression unter Berücksichtigung der ursprünglichen Oberspannungsniveaus und eine unter Berücksichtigung der umgerechneten Oberspannungsniveaus abgebildet. Die Gleichungen der Regressionsgeraden sind im Anhang A-5.3 enthalten.

Es ist zu sehen, dass die Versuchsergebnisse infolge der Umrechnung vertikal in Richtung kleinerer bezogener Oberspannungen verschoben werden. Darüber hinaus ist erkennbar, dass diese Vertikalverschiebungen für die beiden Chargen und Belastungsgeschwindigkeiten unterschiedlich groß sind, was auf die jeweils unterschiedliche Ausprägung der Druckfestigkeitssteigerung zurückzuführen ist. Hierdurch sind die Versuchsergebnisse in vertikaler Richtung stärker gestaffelt als bei der Berücksichtigung der ursprünglichen (zwei) Beanspruchungsniveaus. Aufgrund der Vertikalverschiebung in Richtung kleinerer Beanspruchungsniveaus sowie aufgrund der leichten Verringerung der Neigung der Regressionsgeraden schneiden die auf Basis der umgerechneten Beanspruchungsniveaus ermittelten Regressionsgeraden die Ordinate bei $S_{O,v} < 1,0$.

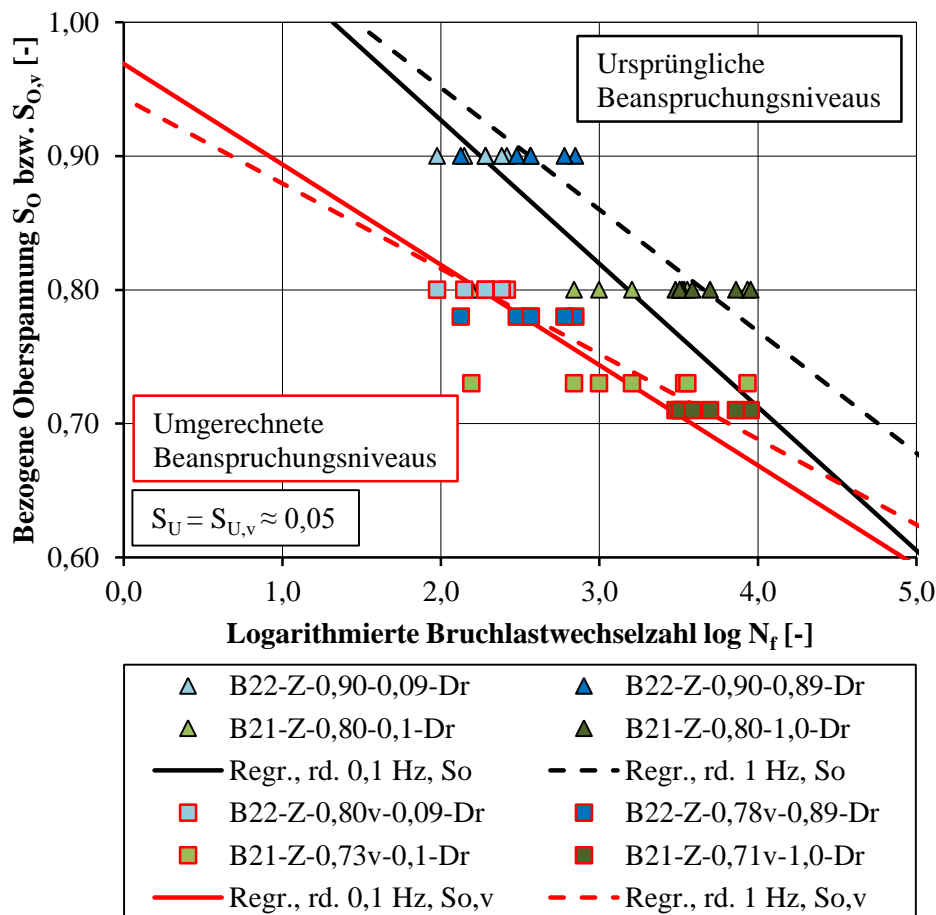


Abbildung 8.14: Dreiecksversuche: Wöhlerdiagramm mit ursprünglichen und umgerechneten Beanspruchungsniveaus (Einzelwerte)

Die Neigungen der Regressionsgeraden verringern sich jeweils etwas durch die Berücksichtigung erhöhter Druckfestigkeiten. Wie anhand der Regressionsgleichungen A 5.1 und A 5.2 bzw. A 5.3 und A 5.4 in Anhang A-5.3 zu sehen ist, ergibt sich jedoch keine Annäherung der Neigungen der Regressionsgeraden für die beiden Frequenzen. Die beiden Regressionsgeraden bei Berücksichtigung der umgerechneten Beanspruchungsniveaus liegen im Bereich der Versuchsergebnisse näher zusammen. Insofern scheint eine bessere gemeinsame Approximation der Bruchlastwechselzahlen bei der Berücksichtigung der umgerechneten Oberspannungsniveaus möglich zu sein.

8.4.4 Ermüdungsversuche mit sinusförmiger Beanspruchung

Anders als bei dreiecksförmiger Beanspruchung ist die Belastungsgeschwindigkeit bei sinusförmiger Beanspruchung im Lastwechsel nicht konstant. Die als Bezugswert anzusetzende Druckfestigkeit würde sich somit theoretisch im Verlauf eines Lastwechsels ändern. Die kleinste Druckfestigkeit würde dabei in den Hoch- und Tiefpunkten der Sinusschwingung bestehen, da die Belastungsgeschwindigkeit hier niedrig ist (Abbildung 6.1). Die größte

Druckfestigkeit bestände beim Durchfahren der Mittellage, da die Belastungsgeschwindigkeit hier am größten ist. Im Bereich der Hoch- und Tiefpunkte, und damit im Bereich extremer Beanspruchungen, werden kurzzeitig Belastungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung der Belastungsgeschwindigkeiten bei der Prüfung von Druckfestigkeiten und darunter erreicht. Wird der Gedanke der belastungsgeschwindigkeitsabhängigen Druckfestigkeitssteigerung konsequent weiterverfolgt, ergäben sich über den Sinusverlauf veränderliche umgerechnete bezogene Beanspruchungen. Wobei die umgerechneten bezogenen Beanspruchungen in den Hoch- und Tiefpunkten am größten und im Bereich der Mittellage am kleinsten wären.

Entsprechend den Ausführungen von [Sparks – 1982] werden für die Auswertung der Sinusversuche konstante Ersatzbelastungsgeschwindigkeiten berechnet (Gleichung 8.4) und die zugehörigen Druckfestigkeiten berücksichtigt. Die Ersatzbelastungsgeschwindigkeit entspricht dabei jeweils den Belastungsgeschwindigkeiten der Versuche mit dreiecksförmiger Beanspruchung bei gleicher Oberspannung und Prüffrequenz (Anhang A-5.3, Tabelle A 5.3). Dementsprechend sind auch die Vertikalverschiebungen der Beanspruchungsniveaus bei sinusförmiger und dreiecksförmiger zyklischer Beanspruchung mit gleichen Beanspruchungsniveaus und Belastungsfrequenzen chargenweise gleich groß.

$$\dot{k}_{\text{ers}} = (F_{\text{max}} - F_{\text{min}}) \cdot 2 \cdot f_p \quad (8.4)$$

Mit:	\dot{k}_{ers}	Ersatzbelastungsgeschwindigkeit
	f_p	Prüffrequenz
	F_{max}	Oberlast
	F_{min}	Unterlast

In Abbildung 8.15 sind die Einzelwerte der Bruchlastwechselzahlen für die Versuche der Chargen B21 und B22 bei $f_p = 0,09 \text{ Hz} - 1,0 \text{ Hz}$ dargestellt. Die Bruchlastwechselzahlen der Versuche mit Frequenzen im Bereich $f_p = 0,1 \text{ Hz}$ und im Bereich $f_p = 1,0 \text{ Hz}$ werden im Folgenden jeweils zusammengefasst betrachtet. In der Darstellung wurden einerseits die ursprünglichen Oberspannungsniveaus und andererseits die umgerechneten Oberspannungsniveaus verwendet.

Wie bei den Versuchsergebnissen der dreiecksförmigen Belastungen (vgl. Abbildung 8.14), ergeben sich durch die Umrechnung der Beanspruchungsniveaus Vertikalverschiebungen der Versuchsergebnisse, wobei diese auch hier aufgrund unterschiedlicher Druckfestigkeitssteigerungen für beide Chargen und Belastungsgeschwindigkeiten unterschiedlich sind. Hierdurch ergibt sich eine stärker vertikal gestaffelte Anordnung der Versuchsergebnisse. Die für die beiden Belastungsfrequenzen $f_p = 0,1 \text{ Hz}$ und $f_p = 1,0 \text{ Hz}$ berechneten Regressionsgeraden für die ursprünglichen und die umgerechneten Beanspruchungsniveaus sind ebenfalls in Abbildung 8.15 zu sehen. Ihre Gleichungen sind in Anhang A-5.3 angegeben.

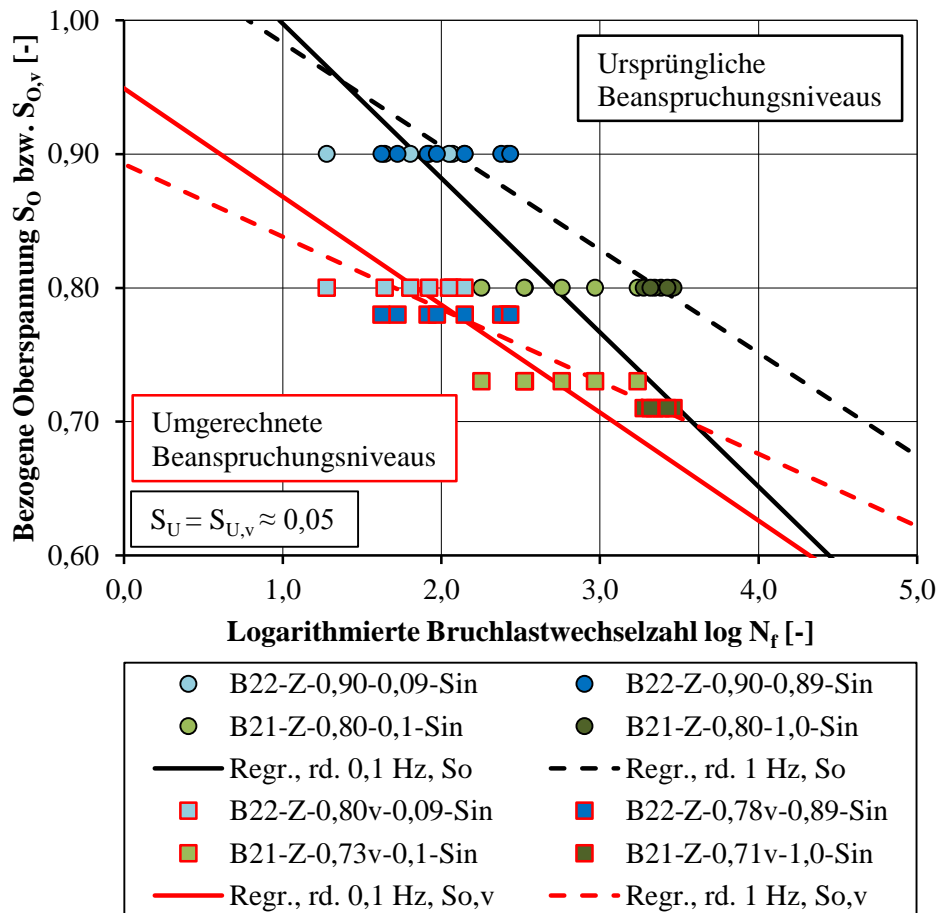


Abbildung 8.15: Sinusversuche: Wöhlerdiagramm mit ursprünglichen und umgerechneten Beanspruchungsniveaus (Einzelwerte)

Infolge der Umrechnung der Beanspruchungsniveaus auf erhöhte Bezugsfestigkeiten ergeben sich etwas geringere Neigungen der Regressionsgeraden. Auch hier nähern sich die Neigungen der Regressionsgeraden für beide Frequenzen bei Berücksichtigung der umgerechneten Beanspruchungsniveaus nicht an, wie anhand der Regressionsgleichungen A 5.5 und A 5.6 bzw. A 5.7 und A 5.8 in Anhang A-5.3 zu erkennen ist. Die beiden Regressionsgeraden bei Berücksichtigung der umgerechneten Beanspruchungsniveaus liegen im Bereich der Versuchsergebnisse näher beieinander. Insofern scheint eine etwas bessere gemeinsame Approximation der Bruchlastwechselzahlen bei der Berücksichtigung der umgerechneten Oberspannungsniveaus gegeben zu sein. Ähnlich wie bei den zuvor ausgewerteten Dreiecksversuchen schneiden die Regressionsgeraden der umgerechneten Beanspruchungsniveaus die Ordinate bei $S_{0,v} < 1,0$.

Zur Vorbereitung der in Abschnitt 8.5 enthaltenen exemplarischen Ableitung eines Zusammenhangs zwischen der zyklischen Beanspruchung und der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase, werden im nächsten Schritt auch die Sinusversuche des Versuchsblocks E2 (B12, B13, B14) berücksichtigt.

In den zu diesen Versuchen gehörenden Tastversuchen des Versuchsblocks S1 wurden jeweils die maximalen bei der zyklischen Beanspruchung auftretenden Belastungsgeschwindigkeiten statt der Ersatzgeschwindigkeiten verwendet. Somit müssen die zu berücksichtigenden Festigkeitssteigerungen infolge der Ersatzgeschwindigkeiten zunächst ermittelt werden. Hierzu wurden die berechneten Regressionsgeraden der Druckfestigkeitssteigerung verwendet (siehe Abbildung 5.5 und Anhang A-2.3). Die Werte der Ersatzgeschwindigkeiten und der erhöhten Druckfestigkeiten sind ebenfalls in Anhang A-5.3, Tabelle A 5.3 enthalten.

In Abbildung 8.16 sind die Bruchlastwechselzahlen sämtlicher Sinusversuche, für die experimentelle Daten der Druckfestigkeitssteigerung vorliegen, in Abhängigkeit von den umgerechneten Oberspannungsniveaus dargestellt. Die in Abbildung 8.16 dargestellte Regression der Einzelwerte lässt sich durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$\log N_f = -11,952 \cdot S_{o,v} + 11,583 \quad r^2 = 0,872 \quad n = 89 \quad (8.5)$$

Diese Gerade ermöglicht die Abschätzung der logarithmierten Bruchlastwechselzahl in Abhängigkeit von der auf die erhöhte Druckfestigkeit bei erhöhter Belastungsgeschwindigkeit bezogenen Oberspannung für verschiedene Belastungsfrequenzen. Abbildung 8.17 zeigt vergleichend die Bruchlastwechselzahlen mit Bezug zu den ursprünglichen Beanspruchungsniveaus. Zur Orientierung ist die Regressionsgerade aus Abbildung 8.16 in dieser Darstellung ebenfalls enthalten. Der Vergleich beider Abbildungen verdeutlicht den positiven Effekt der Berücksichtigung umgerechneter Beanspruchungsniveaus für die gemeinsame Approximation der Bruchlastwechselzahlen infolge verschiedener Belastungsfrequenzen. Dieses Ergebnis ist auch auf die Berücksichtigung von deutlich mehr Versuchsergebnissen als bei den vorherigen Auswertungen zurückzuführen.

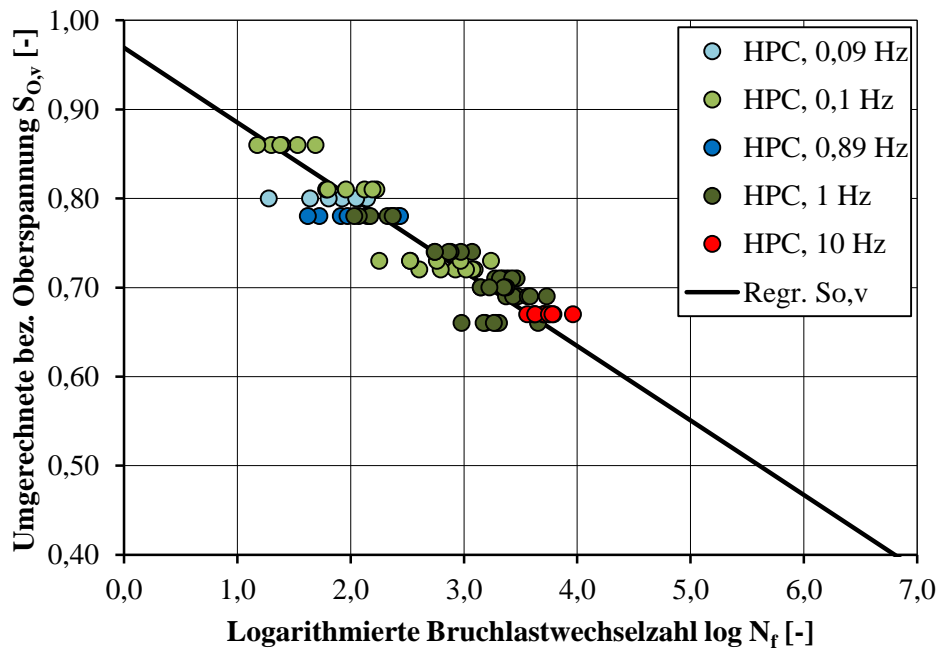


Abbildung 8.16: Wöhlerdiagramm der Sinusversuche unter Berücksichtigung der umgerechneten Beanspruchungsniveaus (Einzelwerte)

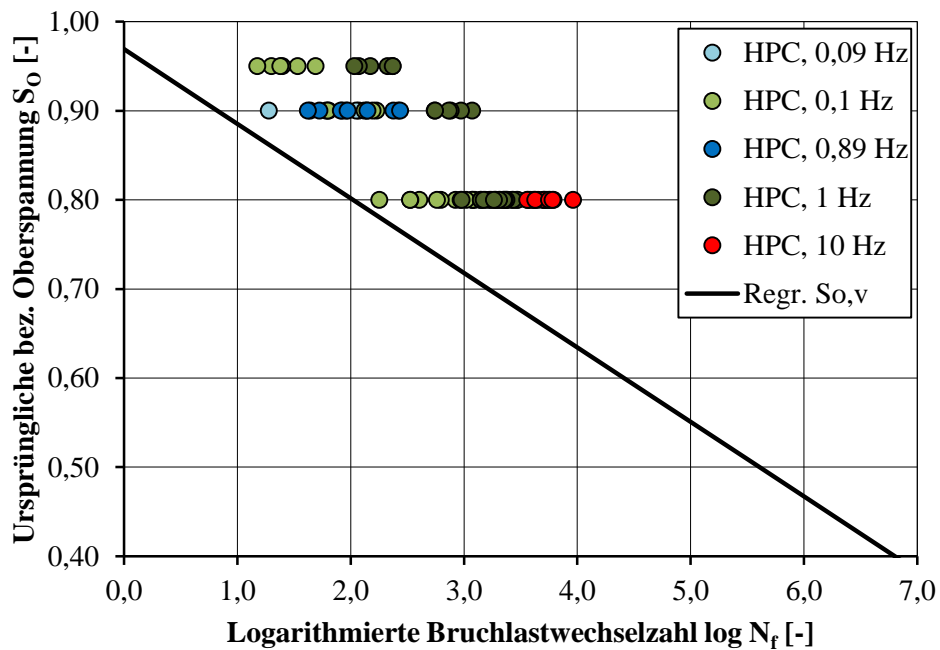


Abbildung 8.17: Wöhlerdiagramm der Sinusversuche unter Berücksichtigung der ursprünglichen Beanspruchungsniveaus (Einzelwerte)

8.4.5 Zusammenfassung und Beurteilung

Insgesamt haben die Auswertungen gezeigt, dass die bei verschiedenen Belastungsfrequenzen ermittelten Bruchlastwechselzahlen sowohl bei sinusförmiger als auch bei dreiecksförmiger zyklischer Belastung im Wöhlerdiagramm vertikal stärker gestaffelt angeordnet sind, wenn die zu den zyklischen Ersatzbelastungsgeschwindigkeiten gehörenden, erhöhten Druckfestigkeiten als Bezugswerte der Beanspruchungen verwendet werden. Gleichzeitig schneiden die auf Basis der umgerechneten Beanspruchungsniveaus ermittelten Regressionsgeraden die Ordinate bei $S_{O,v} < 1,0$.

Hierzu wurde bereits in Abschnitt 6.4.5 dargelegt, dass der normalerweise vorhandene Schnittpunkt $S_O > 1,0$ üblicher Regressionsgeraden größtenteils auf die lineare Approximation im halb-logarithmischen Raum zurückführbar ist. Insofern ist es nicht sinnvoll, den Schnittpunkt der Regressionsgeraden bei $S_{O,v} < 1,0$ zur Begründung des hier untersuchten Approximationsansatzes heranzuziehen.

Es wurde erläutert, dass bei sinusförmigen Beanspruchungen die höchsten Belastungsgeschwindigkeiten in Bereichen mit relativ niedrigen Beanspruchungen auftreten. In Bereichen höchster Beanspruchungen sind die Belastungsgeschwindigkeiten dagegen einerseits niedriger als die berücksichtigte Ersatzgeschwindigkeit und andererseits ergeben sich in diesen Bereichen für verschiedene Belastungsfrequenzen relativ kleine Unterschiede der Belastungsgeschwindigkeiten. Insofern stellt sich die Frage, inwieweit die rechnerisch berücksichtigte Druckfestigkeitssteigerung in diesen Bereichen tatsächlich vorhanden ist.

Eine Annäherung der Neigungen der Regressionsgeraden konnte für beide Wellenformen nicht festgestellt werden. Bei Berücksichtigung der umgerechneten Beanspruchungsniveaus liegen jedoch die Regressionsgeraden der beiden untersuchten Frequenzen im Bereich der Versuchsergebnisse näher beieinander. Dieses kann als bessere gemeinsame Approximationsmöglichkeit interpretiert werden. Insofern können die Ergebnisse von [Sparks / Menzies – 1973] bzw. [Sparks – 1982], auch für sinusförmige zyklische Beanspruchungen, bestätigt werden.

Aufgrund der bei Dreiecksversuchen abschnittsweise konstanten (hohen) Belastungsgeschwindigkeiten, auch im Bereich der höchsten Beanspruchungen, ist mit einer besseren gemeinsamen Approximation für Dreiecksversuche als für Sinusversuche zu rechnen gewesen. Hierfür konnten jedoch keine Anzeichen gefunden werden.

Zu beachten ist jedoch, dass in den vergleichenden Untersuchungen zum Einfluss der Wellenform nur zwei Beanspruchungsniveaus betrachtet wurden, die sich nur um $\Delta S_O = 0,10$ unterscheiden (vgl. Abbildung 8.14, Abbildung 8.15). Insofern sollten die ermittelten Ergebnisse anhand von entsprechenden Untersuchungen mit mehr Beanspruchungsniveaus, die sich gleichzeitig deutlicher unterscheiden, überprüft werden. Die Anwendung des Approximationsansatzes auf sämtliche Sinusversuche, bei denen Daten zur Festigkeitssteigerung vorlie-

gen, zeigt jedoch, dass durch die Berücksichtigung umgerechneter Beanspruchungsniveaus eine bessere gemeinsame Approximation der für verschiedene Belastungsfrequenzen ermittelten Bruchlastwechselzahlen erreicht werden kann. Diese Auswertung verdeutlicht, dass die Qualität der Regressionen einerseits stark abhängig ist von der Anzahl der Versuchsergebnisse und andererseits von der Spannweite der berücksichtigten Beanspruchungsniveaus.

Infolge der gleichen Frequenzerhöhung ändert sich die Belastungsgeschwindigkeit für alle Beanspruchungsniveaus um den gleichen Faktor. Damit führt dies für hohe und niedrige Beanspruchungsniveaus zu erhöhten Druckfestigkeiten. Die erhöhte Druckfestigkeit ist zwar aufgrund der etwas kleineren Belastungsgeschwindigkeiten bei kleineren Beanspruchungsniveaus kleiner. Gleichzeitig wirkt sich der Umrechnungsfaktor weniger stark aus. Dominierend ist aber das Maß der Frequenzerhöhung auf die Belastungsgeschwindigkeit und damit auf die Druckfestigkeit. Eine Begrenzung des Frequenzeinflusses auf hohe Beanspruchungen, wie sie in der Literatur beschrieben ist (vgl. Abschnitt 2.2.5), ist somit durch diesen Approximationsansatz nicht geschlossen abbildbar.

Der Ansatz, die Beanspruchungsniveaus in Bezug zu den erhöhten Druckfestigkeiten bei entsprechenden Belastungsgeschwindigkeiten wie im zyklischen Versuch zu bestimmen, ermöglicht eine einfachere Beschreibung von bei verschiedenen Prüffrequenzen ermittelten Bruchlastwechselzahlen. Im Rahmen der Modellbildung ist dieser Ansatz näherungsweise für Beanspruchungsbereiche, in denen ein Frequenzeinfluss auftritt, anwendbar. Anhand der zuvor aufgeführten Erläuterungen zeigt sich jedoch, dass dieser Approximationsansatz physikalisch nicht vollständig plausibel zu sein scheint. Die Beurteilung der „Druckfestigkeits-Geschwindigkeits-Hypothese“ erfolgt in Kapitel 9.

8.5 Zusammenhang zwischen der zyklischen Beanspruchung und der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase

8.5.1 Einordnung

In Kapitel 5 konnte jeweils ein linearer Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl bzw. zwischen dem logarithmierten Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl abgeleitet werden. Diese Zusammenhänge können zur Abschätzung der Bruchlastwechselzahlen abgebrochener Ermüdungsversuche herangezogen werden. Eine Zuordnung von einer Steigung der Dehnungsentwicklung bzw. einem Gefälle der Steifigkeitsentwicklung zu einer bestimmten zyklischen Beanspruchung (bezogene Oberspannung, Belastungsfrequenz, Wellenform) ist hierdurch jedoch noch nicht möglich (Frage 6, Abschnitt 3.2).

Im Folgenden soll daher, ergänzend zu den vorherigen Auswertungen, aufgezeigt werden, wie ein Zusammenhang zwischen der zyklischen Beanspruchung und der Dehnungsentwicklung bzw. Steifigkeitsentwicklung hergeleitet werden kann. Dabei wird im Folgenden die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase weitergehend betrachtet, da diese gegenüber der Steifigkeit die direkter ermittelbare Größe darstellt.

8.5.2 Ableitung des Zusammenhangs

Für alle untersuchten zyklischen Beanspruchungen wurde ein gemeinsamer linearer Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung bei Oberspannung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl abgeleitet (Abschnitt 6.5.8, Gleichung 6.5). Hier muss jedoch noch ein Zusammenhang zur Art der zyklischen Beanspruchung (bezogene Oberspannung, Belastungsfrequenz, Wellenform) hergestellt werden.

Anhand der eigenen Versuchsergebnisse sind entsprechende $S_O - \log N_f$ -Regressionen für die Sinusversuche und die drei Belastungsfrequenzen ermittelt worden (Gleichungen 6.1 – 6.3). Wird Gleichung 6.5 in die Gleichungen 6.1 – 6.3 eingesetzt, ergeben sich folgende Geraden für die unterschiedlichen Prüffrequenzen:

$$f_p = 0,1 \text{ Hz}, S_U = 0,05: \quad S_O = 0,111 \cdot \log \bar{\epsilon}_{O,N}^{\text{II}} + 1,475 \quad (8.6)$$

$$f_p = 1,0 \text{ Hz}, S_U = 0,05: \quad S_O = 0,149 \cdot \log \bar{\epsilon}_{O,N}^{\text{II}} + 1,790 \quad (8.7)$$

$$f_p = 10,0 \text{ Hz}, S_U = 0,05: \quad S_O = 0,138 \cdot \log \bar{\epsilon}_{O,N}^{\text{II}} + 1,758 \quad (8.8)$$

Die Gleichungen gelten für den untersuchten Oberspannungsbereich $S_O = 0,95 - 0,80$ (bzw. bis 0,70). Sie ermöglichen eine Abschätzung der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase für sinusförmige Belastungen mit einem bezogenen Unterspannungsniveau $S_U = 0,05$ sowie für die Prüffrequenzen $f_p = 0,1 \text{ Hz}$, $1,0 \text{ Hz}$ und $10,0 \text{ Hz}$. Die Geraden sind zusammen mit den Versuchsergebnissen in Abbildung 8.18 dargestellt. Die Bereiche der Geraden, die außerhalb des experimentellen Untersuchungsbereichs liegen, sind gestrichelt dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Geraden der drei Prüffrequenzen unterschiedliche Neigungen aufweisen. Das qualitative Verhältnis der Neigungen zueinander entspricht in etwa dem der Neigungen der Regressionsgeraden zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen S_O und $\log N_f$ (Gleichungen 6.1 – 6.3), vgl. auch Abbildung 6.6.

Die Angabe eines gemeinsamen, frequenzunabhängigen Zusammenhangs ist möglich, wenn die Ergebnisse aus Abschnitt 8.4 verwendet werden. In Abschnitt 8.4 wurde gezeigt, dass die für verschiedene Belastungsfrequenzen ermittelten logarithmierten Bruchlastwechselzahlen näherungsweise durch eine Gerade beschrieben werden können, wenn die auf erhöhte Druck-

festigkeiten bei erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten bezogenen Oberspannungen verwendet werden (Gleichung 8.5).

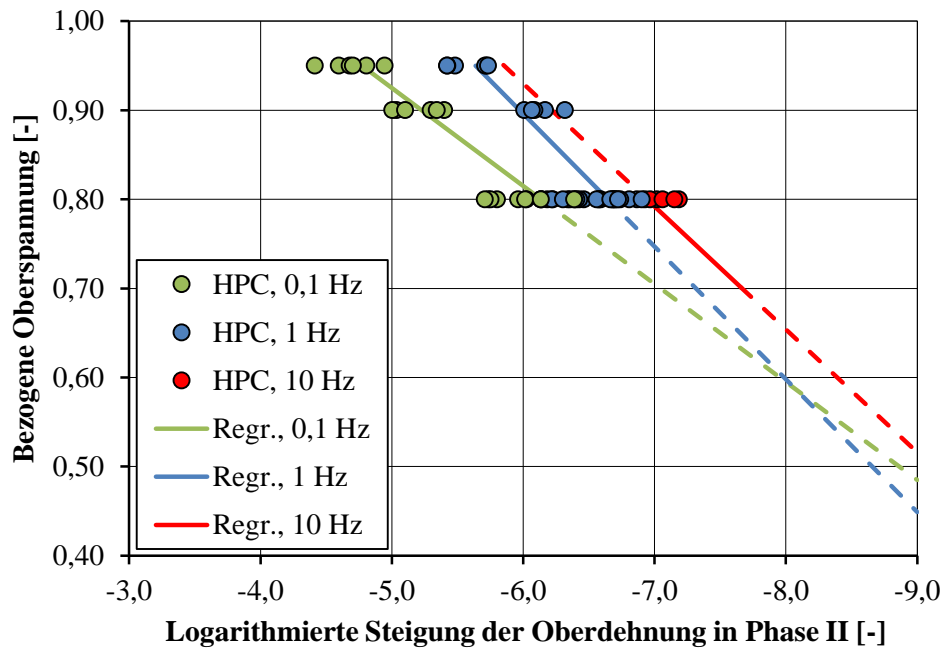


Abbildung 8.18: Zusammenhang zwischen der bezogenen Oberspannung und der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase (Sinusversuche, Einzelwerte)

Wird Gleichung 6.5, der Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl, in Gleichung 8.5 eingesetzt, ergibt sich Gleichung 8.9. Diese Gerade ermöglicht die Abschätzung der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase mithilfe der umgerechneten bezogenen Oberspannung. Somit kann ein gemeinsamer Zusammenhang für die unterschiedlichen Belastungsfrequenzen angegeben werden.

$$S_{O,v} = 0,085 \cdot \log \bar{\epsilon}_{O,N}^{II} + 1,251 \quad S_{U,v} \approx 0,05 \quad (8.9)$$

In Abbildung 8.19 ist diese Gerade zusammen mit den Versuchsergebnissen dargestellt. Wie zu sehen ist, besteht eine sehr gute Übereinstimmung der ermittelten Gleichung mit den eigenen Versuchsergebnissen.

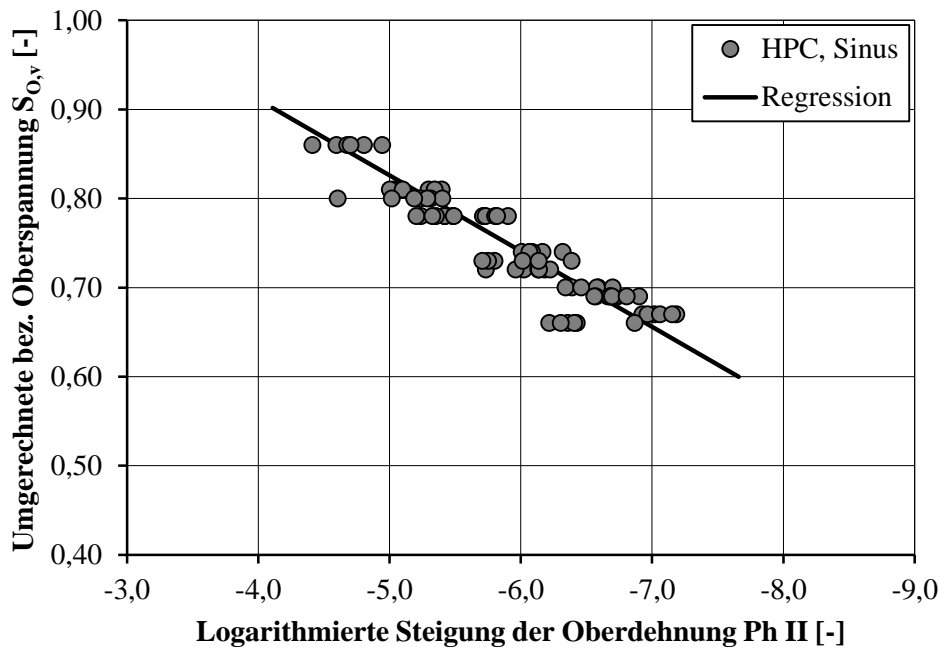


Abbildung 8.19: Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der umgerechneten bezogenen Oberspannung (Sinusversuche)

8.5.3 Zusammenfassung und Beurteilung

Basierend auf den Versuchsergebnissen des hochfesten Betons konnten zunächst lineare Zusammenhänge zwischen dem zyklischen Beanspruchungsniveau und der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase für sinusförmige Belastungen und die drei untersuchten Belastungsfrequenzen abgeleitet werden. Die Ableitung dieser Zusammenhänge war möglich, da ein gemeinsamer Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl für alle zyklischen Beanspruchungen besteht. Durch die Berücksichtigung der auf erhöhte Druckfestigkeiten bezogenen Oberspannungen konnte zusätzlich auch ein gemeinsamer linearer Zusammenhang für verschiedene Belastungsfrequenzen angegeben werden, der die Versuchsergebnisse sehr gut annähert.

Dieser lineare Zusammenhang kann zur Abschätzung der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase grundsätzlich herangezogen werden. Aufgrund der Streuungen der Steigungen in der zweiten Phase und der Bruchlastwechselzahlen sowie aufgrund der Approximation über logarithmierte Größen ist mit den hierauf aufbauenden Gleichungen jedoch nur eine näherungsweise Abschätzung der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase möglich. Der abgeleitete lineare Zusammenhang ist zunächst nur für sinusförmige Versuche, das berücksichtigte Unterspannungsniveau $S_U = 0,05$ bzw. $S_{U,v} \approx 0,05$ und den berücksichtigten Frequenzbereich $f_p = 0,1 \text{ Hz} - 10,0 \text{ Hz}$ anwendbar. Eine Verallgemeinerbarkeit auf andere zyklische Beanspruchungen und andere Betone kann nicht unterstellt werden.

Insgesamt wurde gezeigt, dass systematische Zusammenhänge zwischen den Beanspruchungsniveaus und den Steigungen der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase grundsätzlich, auch frequenzunabhängig, ableitbar sind. Hierfür ist jedoch eine hohe Anzahl von Versuchsergebnissen erforderlich. Gleichzeitig sind diese Zusammenhänge nicht ohne Weiteres auf andere zyklischen Beanspruchungen übertragbar.

Kapitel 9

Beurteilung von Hypothesen zum Ermüdungsverhalten von Betonen

9.1 Vorüberlegungen zu den Hypothesen

In der Literatur sind fünf Hypothesen mit Bezug zum Ermüdungsverhalten von Betonen dokumentiert (siehe Abschnitt 3.2), die nun in den folgenden Abschnitten im Rahmen einer den Beanspruchungsarten übergeordneten Betrachtung beurteilt werden sollen.

Die „Geschwindigkeits-Druckfestigkeits-Hypothese“ ([Sparks / Menzies – 1973], [Sparks – 1982], [Schneider et al. – 2012]) und die „Wirkungsdauer-Hypothese“ ([Weigler / Freitag – 1975], [Klausen – 1978]) beschäftigen sich mit möglichen Ursachen des Einflusses der Belastungsfrequenz auf die Bruchlastwechselzahlen von Beton. Dabei benennt die „Geschwindigkeits-Druckfestigkeits-Hypothese“ eine erhöhte Druckfestigkeit bei erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten als mögliche Ursache des Frequenzeinflusses. Die „Wirkungsdauer-Hypothese“ führt den Frequenzeinfluss dagegen auf eine unterschiedliche Wirkungsdauer hoher Beanspruchungen bei unterschiedlichen Frequenzen zurück.

Die „Geschwindigkeits-Hypothese“ ([Weigler / Freitag – 1975]) betrachtet den Einfluss der Wellenform auf die Bruchlastwechselzahlen. Der Einfluss der Wellenform wird dabei auf unterschiedliche Belastungsgeschwindigkeiten zurückgeführt. Eine konkrete Aussage darüber, inwiefern die Belastungsgeschwindigkeit das Ermüdungsverhalten beeinflusst, wird jedoch nicht getroffen.

Die „Doppeleffekt-Hypothese“ ([Awad / Hilsdorf – 1971]) beschäftigt sich allgemein mit dem Ermüdungsverhalten von Beton bei hohen bezogenen Oberspannungen. Das Ermüdungsverhalten wird auf eine Kombination aus einem zeitlichen und einem zyklischen Effekt zurückgeführt.

Die „Schädigungshypothese“ nach [Pfanner – 2003] besagt, dass bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung die gleiche Arbeit aufgewendet werden muss, um den gleichen Schädigungszustand herzustellen. Basierend auf dieser Hypothese ist ein Energiegleichgewicht zentraler Bestandteil des von [Pfanner – 2003] entwickelten Schädigungsmodells.

Aufgrund der Auswirkungen der Belastungsgeschwindigkeit auf die Spannungs-Dehnungslinie bei monoton steigender Beanspruchung wurde die „Geschwindigkeits-Dehnungs-Hypothese“ abgeleitet, die von einer Beeinflussung der im zyklischen Versuch erreichten Dehnungen durch die Belastungsgeschwindigkeiten ausgeht (vgl. Abschnitt 5.3).

Übergeordnet betrachtet, werden durch fünf dieser Hypothesen drei Faktoren mit dem Ermüdungsverhalten in Zusammenhang gebracht.

- Zeitlicher Effekt, Wirkungsdauer einer bestimmten Beanspruchungshöhe
- Belastungsgeschwindigkeit
- Zyklischer Effekt

Dagegen wird bei der „Schädigungshypothese“ nach [Pfanner – 2003] auf Aspekte der Belastungsgeschwindigkeit nicht (monoton steigend) oder nicht explizit (zyklisch) eingegangen. Anders als die anderen zuvor aufgeführten Hypothesen dient diese Hypothese darüber hinaus auch eher der Beschreibung und weniger der Erklärung des Ermüdungsverhaltens von Beton.

Im Rahmen der eigenen Untersuchungen wurden die zyklischen Belastungsparameter bezogene Oberspannung, Belastungsfrequenz und Wellenform untersucht. Alle drei Belastungsparameter beeinflussen als sekundäre Auswirkung auch die Belastungsgeschwindigkeit bzw. den Belastungsgeschwindigkeitsverlauf im Lastwechsel (vgl. Abschnitt 6.2).

Mit der Änderung der Belastungsgeschwindigkeit bzw. mit der Änderung des Belastungsgeschwindigkeitsverlaufs geht gleichzeitig immer eine Änderung der Wirkungsdauer verschiedener Beanspruchungshöhen einher. Gleichzeitig ist auch von einer Beeinflussung des zyklischen Effekts durch die Belastungsgeschwindigkeit auszugehen, der auf die Be- und Entlastungsvorgänge zurückzuführen ist. Eine getrennte Untersuchung und Beurteilung der zwei oben genannten und in den Hypothesen wiederzufindenden Effekte ist daher anhand von üblichen zyklischen Versuchen mit kontinuierlich aufeinander folgenden Lastwechseln nicht abschließend möglich.

Trotzdem konnten anhand der Auswertungen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen Hinweise auf die Beeinflussung einzelner Kenngrößen durch zyklische und/oder zeitliche Effekte gewonnen werden. Auch die Erkenntnisse aus den vergleichenden experimentellen Untersuchungen zum Materialverhalten bei monoton steigender Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung liefern Hinweise einerseits zum Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit und andererseits zur Ausprägung zeitlicher Effekte bei zyklischer Beanspruchung. Diese sollen im Folgenden gemeinsam zur Beurteilung der zuvor aufgeführten Hypothesen herangezogen werden.

9.2 Zeitliche und zyklische Effekte

Anhand der systematischen Auswertungen der Dehnungsentwicklungen bei unterschiedlichen zyklischen Beanspruchungen wurde festgestellt, dass die Unterdehnungen einen Bezug zur Belastungsdauer aufweisen. Dagegen wurde für die Oberdehnung, die Dehnungsdifferenz zwischen Ober- und Unterdehnung sowie für den prozentualen Steifigkeitsverlust ein Zusammenhang zur Lastwechselzahl festgestellt. Diese Kenngrößen werden also unterschiedlich durch einen zeitlichen und einen zyklischen Effekt beeinflusst.

Ergänzend hierzu zeigte der Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung, dass das Dehnungsverhalten bei Dauerstandbeanspruchung wesentlich stärker vom Beanspruchungsniveau bzw. von Abweichungen vom vorgesehenen Beanspruchungsniveau beeinflusst wird. So wurden bei Dauerstandbeanspruchung wesentlich größere Streuungen der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase, der Dehnungen an den Phasenübergängen, der Bruchdehnung und der Belastungsdauer bis zum Versagen festgestellt als bei zyklischen Beanspruchungen mit gleichem Beanspruchungsniveau. Die größeren Streuungen bei den Dauerstandversuchen können nur durch Abweichungen des tatsächlichen vom vorgesehenen Beanspruchungsniveau hervorgerufen werden und zeigen insofern die stärkere Beeinflussung durch die Beanspruchungshöhe bzw. den zeitlichen Effekt.

Gleichzeitig durchläuft der Beton die Dehnungsentwicklung bis zum Versagen bei zyklischer Beanspruchung schneller als bei Dauerstandbeanspruchung mit gleichem Beanspruchungsniveau. Höhere Belastungsfrequenzen führen dabei im Allgemeinen zu kürzeren Belastungsdauern und damit auch zu kürzeren Wirkungsauern hoher Beanspruchungen. Bei einem alleinigen Bestehen eines Effekts der Wirkungsdauer bei hohen Beanspruchungen, müssten sich insofern längere Belastungsdauern bis zum Versagen bei zyklischer Beanspruchung als bei Dauerstandbeanspruchung ergeben. Dies bestätigt damit, dass gleichzeitig neben dem Effekt der Beanspruchungshöhe in Kombination mit der Wirkungsdauer ein zyklischer Effekt infolge der Be- und Entlastungsvorgänge besteht. Somit ist der zeitliche Effekt bei zyklischer Beanspruchung deutlich weniger ausgeprägt als bei Dauerstandbeanspruchung.

Die vergleichenden Auswertungen der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchungen und Dauerstandbeanspruchungen bestätigen somit die „Doppeleffekt-Hypothese“ von [Awad / Hilsdorf – 1971], die besagt, dass das Ermüdungsverhalten von Betonen unter hohen bezogenen Oberspannungen auf einen zyklischen Effekt und einen zeitlichen Effekt zurückzuführen ist. Bei Ermüdungsbeanspruchung wird der Effekt der Wirkungsdauer unter hohen Beanspruchungen durch einen zyklischen Effekt infolge der Be- und Entlastungsprozesse überlagert.

9.3 Belastungsgeschwindigkeit

Einfluss auf die Dehnung

Ein Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Dehnung im Lastwechsel konnte in den zyklischen Versuchen aufgrund der Art der Lastaufbringung (relativ langsames Anfahren der Mittellast und anschließende zyklische Belastung) anhand der Anfangsdehnungen im ersten Lastwechsel nicht festgestellt werden. Wie erläutert wurde, sind die Dehnungspeaks in den folgenden Lastwechseln für die Untersuchung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit genau genommen nicht verwendbar, da sie bereits von dem aufgrund der vorangegangenen Lastwechsel veränderten Materialverhalten abhängig sind.

Die Versuche mit monotoner Beanspruchungssteigerung unterschiedlich hoher Belastungsgeschwindigkeiten zeigten jedoch, dass das Materialverhalten des hochfesten Betons in Form der Spannungs-Dehnungslinie beeinflusst wird. Im Allgemeinen ist der ansteigende Ast der Spannungs-Dehnungslinie steiler und der lineare Bereich bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten größer. Das heißt, dass für eine bestimmte hohe Spannung bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten eine kleinere Dehnung erreicht wird.

An den Phasenübergängen der Ermüdungsversuche sind die Steifigkeiten bei höheren Belastungsfrequenzen und damit Belastungsgeschwindigkeiten größer als bei niedrigeren Belastungsfrequenzen (vgl. Abschnitt 6.5.8). Gleichzeitig ist jedoch der prozentuale Steifigkeitsverlust in Phase II für höhere Belastungsgeschwindigkeiten größer. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Steifigkeit und damit auch die Dehnung bei Ermüdungsbeanspruchung durch die Belastungsgeschwindigkeit beeinflusst werden.

Auch wenn der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit anhand der Dehnung im ersten Lastwechsel bei Ermüdungsbeanspruchung nicht direkt nachgewiesen werden konnte, ist aufgrund der nachgewiesenen Beeinflussung bei monoton steigender Beanspruchung sowie aufgrund der Erkenntnisse zur Steifigkeit an den Phasenübergängen in Verbindung mit dem prozentualen Steifigkeitsverlust in Phase II davon auszugehen, dass Betone bei höheren Frequenzen und damit höheren Belastungsgeschwindigkeiten pro Lastwechsel weniger stark dehnungsbeansprucht werden.

Die Dauerstandversuche mit unterschiedlichen Laststeigerungsgeschwindigkeiten lieferten einen weiteren Hinweis auf eine Beeinflussung der Dehnungsentwicklung durch die Belastungsgeschwindigkeit. Anhand der eigenen Versuche zeigte sich, dass der Dehnungszuwachs in der Frühphase der konstant gehaltenen Beanspruchung bei vorheriger höherer Belastungsgeschwindigkeit größer ist. Die Ausprägung dieses Effekts ist gleichzeitig für höhere Beanspruchungsniveaus größer. Für Ermüdungsbeanspruchungen bedeutet dies, dass sich im Bereich hoher Beanspruchungen in Abhängigkeit von der vorherigen Belastungsgeschwindigkeit unterschiedlich große Dehnungszuwächse einstellen.

Insgesamt wird die „Geschwindigkeits-Dehnungs-Hypothese“ daher als bestätigt angesehen.

Einfluss auf die Druckfestigkeit

In den Versuchen mit monoton steigender Beanspruchung wurde ebenfalls festgestellt, dass die Druckfestigkeit des hochfesten Betons durch die Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit ansteigt. Insofern ist die Basis für die Überprüfung der „Geschwindigkeits-Druckfestigkeits-Hypothese“ gegeben.

Bei Sinusversuchen treten die Bereiche der höchsten Belastungsgeschwindigkeiten zu denen der höchsten Beanspruchungen versetzt auf. In den Bereichen der höchsten Beanspruchungen sind die Belastungsgeschwindigkeiten einerseits niedriger. Andererseits sind auch die Unterschiede der Belastungsgeschwindigkeiten in diesen Bereichen bei verschiedenen Belastungsfrequenzen von relativ kleiner Größenordnung (Abbildung 6.3). Eine für das Materialverhalten günstige Druckfestigkeitssteigerung wäre also gerade in diesen Bereichen nicht in voller Höhe vorhanden bzw. wäre gerade in diesen Bereichen für verschiedene Belastungsfrequenzen weniger unterschiedlich ausgeprägt.

Ein Zusammenhang zwischen dem Maß der Druckfestigkeitssteigerung von Betonen bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten und dem Maß des Frequenzeinflusses ist bisher nicht wissenschaftlich nachgewiesen. Für hochfeste Betone hat sich zudem gezeigt, dass die Druckfestigkeitssteigerung infolge erhöhter Belastungsgeschwindigkeiten weniger ausgeprägt ist als bei normalfesten Betonen, die Druckfestigkeitssteigerung also mit zunehmender Betonfestigkeit abnimmt (Abschnitt 2.1.3). Wäre die „Geschwindigkeits-Druckfestigkeits-Hypothese“ gültig, so müsste sich für hochfeste Betone daher ein weniger stark ausgeprägter Frequenzeinfluss ergeben. Hierauf konnten in der Literatur keine Hinweise gefunden werden. Der Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit denen von [Holmen – 1979] (Abbildung 6.8) legt eine solche Vermutung ebenfalls nicht nahe.

Anders als bei sinusförmiger Beanspruchung treten bei dreiecksförmiger Beanspruchung in Bereichen hoher Beanspruchungen konstant hohe Belastungsgeschwindigkeiten auf. Bei unterschiedlichen Belastungsfrequenzen sind somit die Unterschiede der Belastungsgeschwindigkeiten, und damit auch die der Druckfestigkeitssteigerungen, wesentlich größer als bei sinusförmiger Beanspruchung. Wäre die Druckfestigkeitssteigerung ursächlich für den Frequenzeinfluss, so müsste der Frequenzeinfluss bei dreiecksförmiger Beanspruchung also stärker ausgeprägt sein als bei sinusförmiger Beanspruchung. Dieses konnte jedoch anhand der Bruchlastwechselzahlen nicht festgestellt werden (vgl. Abschnitt 6.4.4).

Die Berücksichtigung erhöhter Druckfestigkeiten als Bezugswerte der Beanspruchungsniveaus hat darüber hinaus für die Versuche mit dreiecksförmiger Beanspruchung gegenüber denen mit sinusförmiger Beanspruchung keine bessere Approximation der Bruchlastwechselzahlen für verschiedene Frequenzen ergeben (vgl. Abschnitt 8.4).

Als weiteres Indiz für den Einfluss erhöhter Druckfestigkeiten infolge erhöhter Belastungsgeschwindigkeiten wird oftmals angeführt, dass die Regressionen der Bruchlastwechselzahlen im Wöhlerdiagramm die Ordinate bei $S_0 > 1,0$ schneiden. Hierzu wurde in Abschnitt 6.4.5 erläutert, dass dies überwiegend auf die allgemein übliche Approximation der Bruchlastwechselzahlen durch eine Gerade im halb-logarithmischen Raum zurückführbar ist und nicht baustofflich bedingt ist. Zur Begründung der „Geschwindigkeits-Druckfestigkeitshypothese“ sollte dies daher nicht herangezogen werden.

Die durchgeführten Untersuchungen zu den drei Beanspruchungsarten zeigen, dass das Ermüdungsverhalten offensichtlich durch verschiedene Effekte beeinflusst wird. Die zuvor dargestellten Überlegungen zeigen darüber hinaus, dass noch offene Fragen hinsichtlich der „Geschwindigkeits-Druckfestigkeitshypothese“ bestehen. Eine Druckfestigkeitssteigerung infolge erhöhter Belastungsgeschwindigkeiten als alleinige Ursache für den Frequenzeinfluss bei Ermüdungsbeanspruchung wird daher angezweifelt.

9.4 „Schädigungshypothese“ nach *Pfanner*

Bei der „Schädigungshypothese“ nach [Pfanner – 2003] wird davon ausgegangen, dass bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung die gleiche Arbeit aufgewendet werden muss, um den gleichen Schädigungszustand herzustellen. Dabei postuliert [Pfanner – 2003], dass ein solcher, gleicher Schädigungszustand bei monoton steigender Beanspruchung auf dem abfallenden Ast der Spannungs-Dehnungslinie beim Erreichen der Oberspannung der zyklischen Beanspruchung und beim Versagen im zyklischen Versuch existiere. Die gleiche Arbeit bzw. ein Energiegleichgewicht kann somit nur erreicht werden, wenn die zyklische Bruchdehnung größer ist als die Bruchdehnung infolge monoton steigender Beanspruchung.

Ein abfallender Ast der Spannungs-Dehnungslinie ist grundsätzlich nur bei sehr langsamer, Weg-, Verformungs- oder Dehngeschwindigkeit ermittelbar. Gleichzeitig ist ein abfallender Ast der Spannungs-Dehnungslinie bei hochfesten Betonen deutlich schwerer ermittelbar als bei normalfesten Betonen [Siebel – 1989]. Insofern ist die Anwendung der „Schädigungshypothese“, in ihrer ursprünglichen Form, auf hochfeste Betone grundsätzlich schwer möglich. Gleichzeitig ist strittig, inwieweit das Materialverhalten von Beton durch den abfallenden Ast der Spannungs-Dehnungslinie tatsächlich beschrieben wird, vgl. z. B. [Cotsovovs / Pavlović – 2008].

Die eigenen Untersuchungen mit monoton steigender und zyklischer Beanspruchung wurden bei Kraftregelung sowie bei gleichen, hohen Belastungsgeschwindigkeiten durchgeführt. Bei diesem Vorgehen wurde einerseits berücksichtigt, dass ein abfallender Ast der Spannungs-Dehnungslinie für den hochfesten Beton im Allgemeinen bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten nicht ermittelbar sein wird. Andererseits wurde den hohen Belastungsgeschwindigkei-

ten in den Ermüdungsversuchen Rechnung getragen. Die ermittelten Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung waren größer als die Bruchdehnungen infolge zyklischer Beanspruchung. Insofern kann ein Zustand gleicher in Schädigung dissipierter Energien nicht erreicht werden. Die „Schädigungshypothese“ ist somit für kraftgeregelte Druckversuche mit monoton steigender Beanspruchung und zyklischer Beanspruchung mit hohen Beanspruchungsniveaus nicht gültig.

In der Literatur sind Erkenntnisse zu Unterschieden hinsichtlich der Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen im Beton bei verschiedenen Druckbeanspruchungsarten dokumentiert (Diaz / Hilsdorf – 1971, [Shah / Chandra – 1970]). Anhand der Dehnungsentwicklungen konnten in den eigenen Untersuchungen ebenfalls Hinweise auf das Vorhandensein unterschiedlicher Gefügestände bzw. Mikrorisszustände bei unterschiedlichen zyklischen Beanspruchungen sowie bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung abgeleitet werden. Sollte die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten bzw. bei unterschiedlichen zyklischen Beanspruchungen im Druckbereich unterschiedlich sein, so wären gleichzeitig die dissipierten Energien unterschiedlich. Hier besteht möglicherweise ein wesentlicher Unterschied zu Zugbeanspruchungen, bei denen das Versagen durch die lokalisierte Ausbildung eines Makrorisses eintritt.

Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen und die Ergebnisse der in der Literatur dokumentierten Untersuchungen lassen die Vermutung zu, dass das Versagen bei unterschiedlichen Schädigungszuständen eintreten könnte. Insofern stellt sich die grundlegende Frage, ob und wann infolge verschiedener Beanspruchungsarten gleiche Schädigungszustände erreicht werden, wie im Rahmen der „Schädigungshypothese“ nach [Pfanner – 2003] angenommen wird. Zu bedenken sind hierbei auch die Beanspruchungshöhe, die Belastungsgeschwindigkeit und ggf. die Wellenform sowie die Regelungsart, die die Spannungs-Dehnungslinie bzw. die Dehnungsentwicklung beeinflussen. Es zeigt sich insgesamt, dass hinsichtlich der „Schädigungshypothese“ offene Fragen bestehen. Hierzu sind zukünftig weitergehende Untersuchungen erforderlich.

9.5 Zusammenfassung

Anhand der eigenen experimentellen Untersuchungen mit zyklischen Beanspruchungen sowie mit monoton steigenden Beanspruchungen und Dauerstandbeanspruchungen an einem hochfesten Beton wurden Hinweise auf eine Abhängigkeit des Ermüdungsverhaltens von einem zeitlichen Effekt, bzw. von der Wirkungsdauer unter hohen Beanspruchungen, von einem zyklischen Effekt, bzw. von den Be- und Entlastungsvorgängen, sowie von der Belastungsgeschwindigkeit ermittelt. Es wurde weiterhin festgestellt, dass sich die drei Faktoren gegenseitig beeinflussen.

Insgesamt konnte die „Doppeleffekt-Hypothese“ anhand der eigenen Versuchsergebnisse bestätigt werden. Die „Wirkungsdauer-Hypothese“ und die „Geschwindigkeits-Hypothese“ können jeweils für sich allein nicht bestätigt werden. Zwar konnten die enthaltenen Effekte anhand der eigenen Versuche beobachtet werden, allerdings zeigen die eigenen Ergebnisse nicht, dass einer der Effekte alleinige Ursache für den Frequenzeinfluss bzw. den Einfluss der Wellenform ist.

Die „Geschwindigkeits-Druckfestigkeits-Hypothese“ wird vor dem Hintergrund der eigenen Untersuchungen, aber auch vor dem Hintergrund grundlegender Überlegungen zum Frequenzeinfluss, angezweifelt. Die Druckfestigkeitssteigerung scheint nicht alleinige Ursache für den Frequenzeinfluss zu sein. Vielmehr ist von einer Beeinflussung des gesamten Materialverhaltens von Beton im Lastwechsel und damit im Ermüdungsprozess infolge erhöhter Belastungsgeschwindigkeiten auszugehen. Die „Geschwindigkeits-Dehnungs-Hypothese“ konnte dagegen bestätigt werden.

Die „Schädigungshypothese“ nach [Pfanner – 2003] konnte anhand der eigenen experimentellen Untersuchungen nicht bestätigt werden. Zudem wurde dargelegt, dass zu dieser Hypothese grundlegende Fragen existieren. Hierzu sind zukünftig weitergehende Untersuchungen insbesondere dazu erforderlich, inwieweit gleiche Schädigungszustände bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten tatsächlich existieren.

Kapitel 10

Übertragung der Untersuchungsergebnisse in eine Modellvorstellung

10.1 Überblick

In der Literatur sind Ansätze zur Beschreibung der Dehnungen und der Dehnungsanteile im Lastwechsel (vgl. z. B. [Schwabach – 2005]) oder zur Beschreibung der Dehnungen und Dehnungsanteile im Ermüdungsprozess zu finden (vgl. z. B. [Pfister – 2007]). Die Ansätze zur Beschreibung der Dehnungen und Dehnungsanteile im Lastwechsel dienen zur Erklärung baustofflicher Phänomene. Die Ansätze zur Beschreibung der Dehnungen und Dehnungsanteile im Ermüdungsprozess finden ihre Anwendung in der numerischen Modellierung. Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen in eine Modellvorstellung übertragen. Die Modellvorstellung ermöglicht die Beschreibung der in den Experimenten anhand der Dehnungsentwicklungen beobachteten baustofflichen Phänomene. Dabei werden die Dehnungsanteile sowohl im einzelnen Lastwechsel als auch im gesamten Ermüdungsprozess und somit auf zwei Modellebenen betrachtet. Die Modellvorstellung wird anhand der Ergebnisse der detaillierten Analyse der Dehnungsentwicklungen (vgl. Abschnitt 6.5) angewendet und erweitert.

10.2 Beschreibung der Dehnungsanteile im Lastwechsel

Zunächst wird der einzelne Lastwechsel als erste Modellebene betrachtet. Diese Modellebene „Lastwechsel“ eignet sich zur Abbildung der zeitlichen Effekte innerhalb des Lastwechsels. Der für einzelne Kenngrößen festgestellte stärkere Zusammenhang zur Belastungsdauer (vgl. Abschnitt 6.5.8) muss sich als Folge der zeitlichen Effekten auf die Dehnungsanteile im Lastwechsel ergeben.

In Abbildung 10.1 ist die den eigenen Überlegungen zugrunde liegende Modellvorstellung der Dehnungsanteile im Lastwechsel dargestellt. Wird ein beliebiger Lastwechsel im Ermüdungsprozess betrachtet, so treten bei Laststeigerung ein elastischer Anteil ε_{el}^d , ein plastischer Anteil ε_{pl} sowie ein visko-elastischer Anteil ε_{v-el} auf. Die Dehnungen bei Oberspannung setzen sich dementsprechend aus einem elastischen, einem plastischen und einem visko-elastischen Dehnungsanteil zusammen. Dieser elastische Anteil ε_{el}^d entspricht aufgrund der bereits statt-

gefundenen Vorbelastung nicht der elastischen Dehnung im ersten Lastwechsel ε_{el}^0 , sondern ist aufgrund der zu diesem „Zeitpunkt“ bereits degradierten Steifigkeit größer als die elastische Ausgangsdehnung ε_{el}^0 zu Beginn der Ermüdungsbelastung. Bei Entlastung geht der elastische Dehnungsanteil ε_{el}^d vollständig zurück. Die elastische Dehnung ε_{el}^d und die degradierte Steifigkeit drücken eine leichtere Verformbarkeit des Gefüges aus.

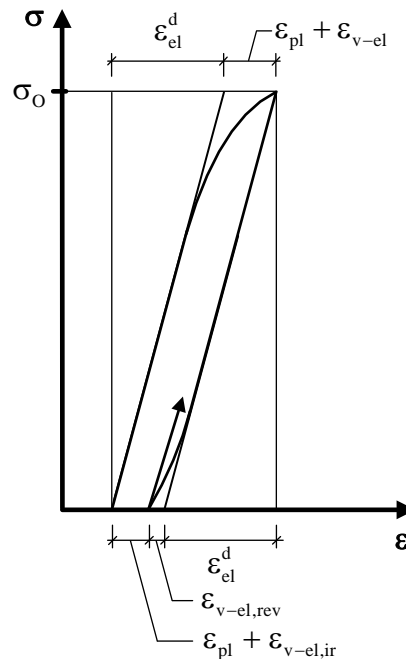


Abbildung 10.1: Dehnungsanteile im Lastwechsel (Modellebene „Lastwechsel“)
(angelehnt an [Schwabach – 2005])

Aus der Literatur ist bekannt, dass nach vorangegangener Druckschwellbeanspruchung und anschließender Entlastung mit Ruhephase ein deutliches Rückkriechen festzustellen ist (vgl. [Gaede – 1962], [Petković et al. – 1992], [Breitenbücher et al. – 2007]). Es treten also im Lastwechsel neben den plastischen Dehnungsanteilen ε_{pl} visko-elastische Dehnungsanteile ε_{v-el} auf, die sich aufgrund der begrenzten Dauer der Entlastungsphase nicht vollständig zurückbilden können. In der Modellvorstellung wird dem entsprochen, indem die visko-elastische Dehnung in einen reversiblen Anteil $\varepsilon_{v-el,rev}$ und einen irreversiblen Anteil $\varepsilon_{v-el,ir}$ unterteilt wird (Abbildung 10.1). „Irreversibel“ bedeutet hier „aufgrund der begrenzten Dauer der Entlastungsphase nicht reversibel“ und darf nicht mit einer visko-plastischen Dehnung verwechselt werden.

Bei Entlastung geht die elastische Dehnung ε_{el}^d unmittelbar vollständig zurück. Auch die reversible visko-elastische Dehnung $\varepsilon_{v-el,rev}$ geht zurück. Bei Unterspannung verbleiben somit ein plastischer Dehnungsanteil ε_{pl} und ein irreversibler visko-elastischer Anteil $\varepsilon_{v-el,ir}$. Im Rahmen der Modellvorstellung wird auf eine Differenzierung in plastische und visko-plastische Dehnungsanteile verzichtet. Beide Anteile werden gemeinsam als plastischer Dehnungsanteil ε_{pl} bezeichnet. Die plastische und die irreversible visko-elastische Dehnung wer-

den im Folgenden gemeinsam betrachtet und als „bleibende Dehnung“ bezeichnet, da eine Differenzierung anhand der bei kontinuierlicher Ermüdungsbeanspruchung gemessenen Verformungen nicht möglich ist. Die bleibenden Dehnungen vergrößern sich inkrementell beanspruchungs- und zeitabhängig in jedem Lastwechsel.

Bei Unterspannungsniveaus größer als Null beinhaltet die Dehnung bei Unterspannung zusätzlich einen elastischen Dehnungsanteil. In den betrachteten Versuchen war das Unterspannungsniveau mit $S_U = 0,05$ sehr niedrig gewählt. Der elastische Dehnungsanteil der Unterdehnung ist somit relativ klein und wird bei den folgenden Betrachtungen daher vernachlässigt.

Die Forschung zum zeitabhängigen Verformungsverhalten von Betonen konzentrierte sich in der Vergangenheit hauptsächlich auf deutlich niedrigere Beanspruchungsniveaus, d. h. auf den Bereich des linearen Kriechens, als die in den durchgeführten Ermüdungsversuchen vorgesehenen Beanspruchungsniveaus. Zudem wurden die zeitabhängigen Verformungen über deutlich längere Belastungs- und Entlastungsdauern betrachtet, als sie in einem Lastwechsel bei den gewählten Belastungsfrequenzen auftreten. Zum beanspruchungsabhängigen Rückkriechen sind in der Literatur zudem weniger Erkenntnisse als zum Kriechen und teilweise widersprüchliche Ergebnisse dokumentiert [Anders – 2013]. Es sind der Autorin keine Untersuchungen zur Übertragbarkeit von Kriech- und Rückkriechansätzen auf die Entstehung zeitabhängiger Verformungen bei Ermüdungsbeanspruchung bekannt. Zur Entstehung der bleibenden Verformungen im Lastwechsel müssen daher im Folgenden Hypothesen aufgestellt werden, die das experimentell ermittelte Dehnungsverhalten bei Ermüdungsbeanspruchung widerspiegeln.

Im Folgenden wird in Analogie zu den Begrifflichkeiten zur Beschreibung des zeitabhängigen Verformungsverhaltens von Betonen von „Kriechen“ und „Rückkriechen“ gesprochen. Es ist jedoch zu beachten, dass deutlich höhere Oberspannungen außerhalb des Bereichs des linearen Kriechens sowie extrem kürzere Zeitspannen als bei üblichen Kriechbetrachtungen betrachtet werden.

Zur Übertragung der Untersuchungsergebnisse auf dieser Modellebene „Lastwechsel“ wird der zeitabhängige Dehnungszuwachs pro Lastwechsel bzw. pro Zeiteinheit betrachtet. Dieser drückt sich in den Steigungen der Dehnungsentwicklungen bei Ober- bzw. Unterspannung in aus. Zusätzlich wird die Steifigkeitsabnahme pro Lastwechsel bzw. pro Zeiteinheit betrachtet, die sich in dem Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase ausdrückt. Entsprechend der zugrunde liegenden Modellvorstellung und aufgrund der im Ermüdungsprozess konstanten bezogenen Ober- und Unterspannungen, steht die Steifigkeitsabnahme auch mit dem Anstieg der elastischen Dehnung ε_{el}^d pro Lastwechsel im Zusammenhang. Dabei führt eine kleinere Steifigkeit bei gleicher bezogener Oberspannung zu einer größeren elastischen Dehnung.

10.3 Beschreibung der Dehnungsanteile im Ermüdungsprozess

In der zweiten Modellebene „Ermüdungsprozess“ wird der Ermüdungsprozess bis zu einem bestimmten „Zeitpunkt“ betrachtet. Auf dieser Modellebene wird der anhand der Versuchsergebnisse festgestellte zyklische Effekt betrachtet, der mit der Anzahl an Lastwechseln in Verbindung steht. Wird ein „Zeitpunkt“ im Ermüdungsprozess betrachtet, muss berücksichtigt werden, dass aufgrund der Steifigkeitsdegradation im vorangegangenen Ermüdungsprozess bei Oberspannung eine elastische Dehnung ε_{el}^d existiert, die gegenüber der ursprünglichen elastischen Dehnung ε_{el}^0 größer ist, wie in Abbildung 10.2 dargestellt ist. Die elastische Dehnung ε_{el}^d ergibt sich bei Belastung als Folge der zum betrachteten „Zeitpunkt“ vorhandenen Steifigkeit.

Aufgrund des in der Literatur beschriebenen Rückkriechens nach Entlastung bei vorangegangener Ermüdungsbeanspruchung ([Gaede – 1962], [Petković et al. – 1992], [Breitenbücher et al. – 2007]) ist davon auszugehen, dass sich der irreversible Dehnungsanteil $\varepsilon_{v-el,ir}$ im Ermüdungsprozess über die Lastwechsel akkumuliert. Gleichzeitig akkumuliert sich auch die plastische Dehnung ε_{pl} im Verlauf der Ermüdungsbeanspruchung. In der Modellvorstellung auf dieser Modellebene stellen die Dehnungsanteile ε_{pl} und $\varepsilon_{v-el,ir}$ die in den vorangegangenen Lastwechseln akkumulierten plastischen bzw. irreversiblen visko-elastischen Dehnungen dar.

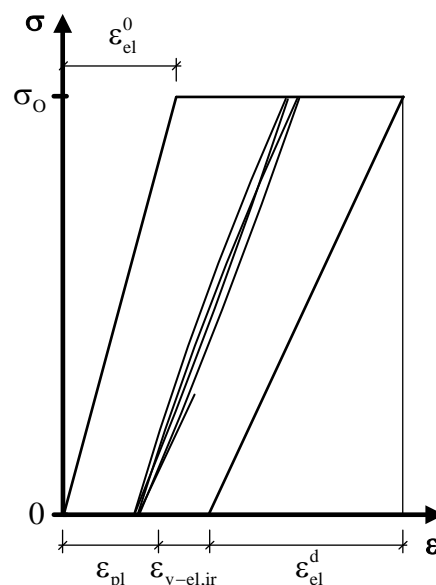


Abbildung 10.2: (Akkumulierte) Dehnungsanteile im Ermüdungsprozess
(Modellebene „Ermüdungsprozess“) (angelehnt an [Pfister – 2007])

Die Steifigkeit wird im Allgemeinen als Sekantenmodul über die Dehnungen an den Belastungspeaks im Entlastungsast ermittelt (vgl. Abschnitt 2.2.1) und ist auch so im Rahmen der Modellvorstellung definiert. Bei ihrer Berechnung gehen somit die im betrachteten Lastwechsel inkrementell entstehenden plastischen und visko-elastischen Dehnungsanteile mit ein.

Wird ein bestimmter Lastwechsel im vorangeschrittenen Ermüdungsprozess betrachtet, so sind die inkrementell im betrachteten Lastwechsel entstehenden plastischen und visko-elastischen Dehnungen jedoch gegenüber den bereits über die vorherigen Lastwechsel akkumulierten plastischen und visko-elastischen Dehnungen klein. Insofern können die im betrachteten Lastwechsel entstandenen plastischen und visko-elastischen Dehnungen auf dieser Modellebene „Ermüdungsprozess“ näherungsweise vernachlässigt werden. Das heißt, zu einem bestimmten „Zeitpunkt“ der Ermüdungsbelastung besteht der Unterschied der Dehnungen bei Oberspannung und Unterspannung in der elastischen Dehnung ε_{el}^d .

Die experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit bei monoton steigender Beanspruchung haben gezeigt, dass die Steifigkeit eines zuvor unbelasteten Betons bei höherer Belastungsgeschwindigkeit größer ist als bei niedrigerer Belastungsgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 5.3). Diese Erkenntnis wird auf die bereits degradierte Betonsteifigkeit übertragen. Wird von einer bestimmten (degradierten) Steifigkeit ausgegangen, so ist die sichtbare Steifigkeit bei höherer Belastungsfrequenz und damit höherer Belastungsgeschwindigkeit größer als bei niedrigerer Belastungsfrequenz. Der elastische Dehnungsanteil ε_{el}^d ist dementsprechend bei zyklischer Beanspruchung mit höherer Belastungsfrequenz kleiner als bei zyklischer Beanspruchung mit niedrigerer Belastungsfrequenz. Gleichzeitig ist die Steifigkeit auch von der Beanspruchungshöhe und von der Last-Zeit-Funktion abhängig.

Der prozentuale Steifigkeitsverlust in Phase II bezieht sich auf die Ausgangssteifigkeit im ersten Lastwechsel und berücksichtigt dadurch die Abhängigkeit der Steifigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit, Beanspruchungshöhe und der Last-Zeit-Funktion. Der prozentuale Steifigkeitsverlust ist daher für die Beurteilung eines Degradationsgrades am besten geeignet.

Zur Übertragung der Untersuchungsergebnisse auf dieser Modellebene werden die Unterdehnung sowie die Dehnungsdifferenz zwischen der Ober- und Unterdehnung am Phasenübergang II/III herangezogen. Bei den Vergleichen ist zu beachten, dass die mittlere Lastwechselzahl bzw. die mittlere Belastungsdauer am Phasenübergang II/III für die verschiedenen Versuchsserien immer unterschiedlich ist.

Die Dehnung bei Unterspannung entspricht der Summe aus akkumulierter plastischer und irreversibler visko-elastischer Dehnung zum betrachteten „Zeitpunkt“, die zusammen als bleibende Dehnung bezeichnet werden. Die Differenz aus Ober- und Unterdehnung entspricht der elastischen Dehnung ε_{el}^d im aktuellen Lastwechsel. Zusätzlich werden die Steifigkeiten an den Phasenübergängen und der prozentuale Steifigkeitsverlust in Phase II betrachtet. Der prozentuale Steifigkeitsverlust in Phase II wird zur vergleichenden Beurteilung des Degradationsgrades herangezogen.

10.4 Übertragung und Anwendung der Modellvorstellung auf die Ermüdungsversuche

10.4.1 Eingrenzung der verwendeten Versuchsergebnisse

Für die Anwendung der vorgestellten Modellvorstellung werden die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen in der zweiten Phase zugrunde gelegt. In dieser Phase verlaufen die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen annähernd linear. Anhand der folgenden Beschreibungen wird die Anwendung der vorgestellten Modellvorstellung gezeigt. Dabei soll insbesondere eine Herangehensweise und somit eine Denkweise bei der Erklärung des Materialverhaltens bei Ermüdungsbeanspruchung aufgezeigt werden. Hierzu werden exemplarisch der Einfluss der bezogenen Oberspannung und der Einfluss der Belastungsfrequenz betrachtet.

Die Beeinflussung der im Weiteren verwendeten Kenngrößen ist beim Wechsel der Wellenform weniger deutlich ausgeprägt (vgl. Abschnitt 6.5), sodass der Einfluss der Wellenform im ersten Schritt nicht betrachtet wird. Die Übertragung der Modellvorstellung auf den Einfluss der Wellenform ist jedoch grundsätzlich möglich. Die bezogene Oberspannung und die Belastungsfrequenz werden beim Wechsel der Wellenform nicht beeinflusst. Dementsprechend müsste bei der Betrachtung der Entstehung der bleibenden Dehnungen im Lastwechsel der Effekt der unterschiedlichen Dauer bei hohen und niedrigen Beanspruchungen infolge der unterschiedlichen Last-Zeit-Funktionen betrachtet werden. Des Weiteren wird auch die sichtbare Steifigkeit und die elastische Dehnung ε_{el}^d zu einem bestimmten „Zeitpunkt“ des Ermüdungsprozesses durch den unterschiedlichen Geschwindigkeitsverlauf beeinflusst. Dabei ist davon auszugehen, dass die Steifigkeit und die elastische Dehnung durch die Änderung des Geschwindigkeitsverlaufs weniger beeinflusst werden als durch die erhöhte Belastungsgeschwindigkeit infolge einer um Faktor 10 höheren Belastungsfrequenz.

10.4.2 Zeitliche und zyklische Effekte

Die systematische Auswertung der Oberdehnung, Unterdehnung, Dehnungsdifferenz und Steifigkeit an den Phasenübergängen sowie die Auswertung des prozentualen Steifigkeitsverlusts in Phase II über die Lastwechselzahl bzw. über die Belastungsdauer hat gezeigt, dass die Unterdehnung einen Bezug zur Belastungsdauer aufweist (vgl. Abbildung A 3.10). Dagegen werden die Oberdehnung und die Dehnungsdifferenz an den Phasenübergängen stärker von der Lastwechselzahl beeinflusst (vgl. Abbildung 6.21, Abbildung 6.22, Abbildung 6.25, Abbildung 6.26). Der prozentuale Steifigkeitsverlust in Phase II ist ebenfalls von der Lastwechselzahl abhängig (Abbildung 6.35). Die Steifigkeit an den Phasenübergängen zeigt dagegen weder eine Abhängigkeit von der Lastwechselzahl noch von der Belastungsdauer (Abbildung 6.33, Abbildung 6.34 bzw. Abbildungen A 3.20), obwohl sie sich direkt aus der Dehnungsdifferenz berechnet.

Insofern ist ableitbar, dass die Unterdehnungen bzw. bleibenden Dehnungen eher durch einen zeitlichen Effekt und die Oberdehnungen, Dehnungsdifferenzen und der prozentuale Steifigkeitsverlust in Phase II durch einen zyklischen Effekt beeinflusst werden. Die Steifigkeit an den Phasenübergängen zeigt keinen eindeutigen Bezug und muss genauer betrachtet werden. Die angewendete Modellvorstellung berücksichtigt beide Effekte durch die Betrachtung von zwei Modellebenen („Lastwechsel“ und „Ermüdungsprozess“).

10.4.3 Einfluss der bezogenen Oberspannung

Zunächst wird der Einfluss der bezogenen Oberspannung betrachtet. Zu beachten ist, dass die Spannungsamplitude zwischen den verglichenen Versuchsserien nicht gleich ist. Dieses hat eine unmittelbare Auswirkung auf die auftretende elastische Dehnung ε_{el}^d . Die Belastungsfrequenz und damit die Dauer eines Lastwechsels sowie die Wellenform bleiben infolge des Oberspannungswechsels unbeeinflusst. Allerdings wird durch die Verkleinerung der bezogenen Oberspannung die Wirkungsdauer hoher Beanspruchungen verkleinert und die Wirkungsdauer niedriger Beanspruchungen etwas vergrößert (Abbildung 6.2).

Bei den untersuchten Größenordnungen der Änderung der bezogenen Oberspannung ($\Delta S_O = 0,05$ und $\Delta S_O = 0,10$) wird die Belastungsgeschwindigkeit im Lastwechsel deutlich weniger beeinflusst als bei der Änderung der Belastungsfrequenz um Faktor 10 (vgl. Abschnitt 6.2). Bei der Betrachtung des Einflusses der bezogenen Oberspannung auf die Steifigkeit wird der Einfluss der sich gleichzeitig verändernden Belastungsgeschwindigkeit daher in erster Näherung vernachlässigt.

Betrachtung des Dehnungszuwachses im Lastwechsel (Modellebene „Lastwechsel“)

Die systematische Auswertung der Dehnungsentwicklungen hat gezeigt, dass die Steigungen in der zweiten Phase der Dehnungsentwicklung bei Ober- bzw. Unterspannung bezogen auf die Lastwechselzahl $\bar{\varepsilon}_{O,N}^{II}$ und $\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$ bzw. bezogen auf die Belastungsdauer $\bar{\varepsilon}_{O,t}^{II}$ und $\bar{\varepsilon}_{U,t}^{II}$ für niedrigere bezogene Oberspannungen kleiner sind (vgl. Abbildung 6.30, Abbildung 6.31 und Abbildung A 3.18, A 3.19). Der Zuwachs an Unterdehnung sowie der Zuwachs an Oberdehnung sind somit pro Lastwechsel und Zeiteinheit kleiner.

Gleichzeitig ist das Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase bezogen auf die Lastwechselzahl $\bar{E}_{S,N}^{II}$ bzw. bezogen auf die Belastungsdauer $\bar{E}_{S,t}^{II}$ für niedrigere bezogene Oberspannungen kleiner (vgl. Abbildung 6.36, Abbildung A 3.22). Das bedeutet, dass die Steifigkeit pro Lastwechsel bzw. pro Zeiteinheit bei niedrigeren bezogenen Oberspannungen weniger stark abnimmt. Dementsprechend steigt die elastische Dehnung ε_{el}^d bei niedrigeren Oberspannungsniveaus pro Lastwechsel bzw. pro Zeiteinheit weniger stark an.

Zunächst soll die Unterdehnung betrachtet werden. Die Steigung der Dehnungsentwicklung bei Unterspannung ist infolge der Verkleinerung der bezogenen Oberspannung kleiner. Wird der Modellvorstellung gefolgt, muss die im Lastwechsel entstehende bleibende Dehnung (Summe aus plastischer und irreversibler visko-elastischer Dehnung) bei kleineren Oberspannungen somit kleiner sein.

In Anlehnung an die aus der Literatur bekannte Darstellung von Kriechvorgängen (vgl. Abbildung 2.6) sind die viskosen Dehnungen in Abbildung 10.3 dargestellt. Zu sehen ist die vom Kriechen bekannte Dehnungs-Zeit-Funktion für konstante Belastungen zweier Beanspruchungshöhen, aber gleicher Dauer. Elastische Dehnungsanteile sind in Abbildung 10.3 nicht dargestellt, da diese bei der zugrunde liegenden Modellvorstellung der elastischen Dehnung ε_{el}^d zugeordnet werden.

Der Anstieg der viskosen Dehnung ist bei höherer Beanspruchung stärker ausgeprägt. Es wird hier davon ausgegangen, dass das Rückkriechen nach höherer Beanspruchung zunächst nicht-linearer verläuft, sich aber einer höheren Dehnung als bei niedrigerer Beanspruchung asymptotisch annähert. So ist die nach theoretisch endloser Entlastungsdauer bleibende plastische Dehnung aufgrund der höheren Beanspruchung mit gleicher Dauer größer als bei niedrigerer Beanspruchungshöhe, was plausibel ist.

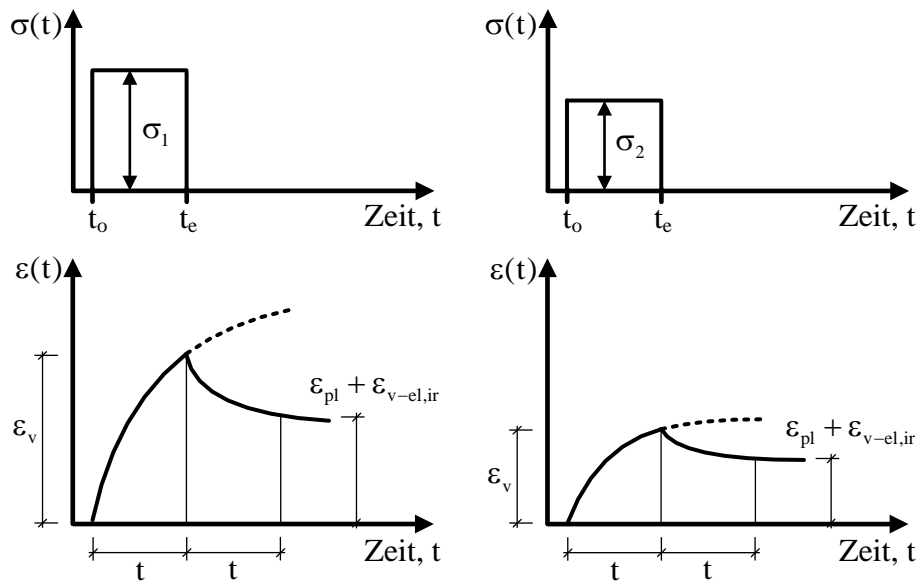


Abbildung 10.3: Verlauf viskoser Dehnungen bei konstanter Beanspruchung unterschiedlicher Höhe (schematisch)

Bei Ermüdungsbeanspruchung wirken zwar keine konstanten Beanspruchungen und auch keine länger andauernde Entlastung, die vorgestellten Zusammenhänge sind aber grundsätzlich auch auf Bereiche der Be- und Entlastungsphase übertragbar. Wird diese Vorstellung auf die Be- und Entlastungsphasen bei Ermüdungsbeanspruchung übertragen, würden bei kleinerer Oberspannung pro Lastwechsel tatsächlich weniger bleibende Dehnungen $\varepsilon_{pl} + \varepsilon_{v-el}$ entstehen (vgl. Abbildung 10.3). Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass bei niedrigerer Ober-

spannung, aber gleicher Unterspannung für die Entstehung viskoser Dehnungen im Bereich hoher Beanspruchungen weniger Zeit zur Verfügung steht und für den Rückgang dieser Dehnungen bei niedrigen Beanspruchungen etwas mehr Zeit zur Verfügung steht als bei höherer Oberspannung (vgl. Abbildung 6.2).

Wird die Verkleinerung der Steigung der Dehnungsentwicklung bei Oberspannung in der zweiten Phase betrachtet, so kann diese teilweise auf die zuvor beschriebene geringere Zunahme bleibender Dehnungen pro Lastwechsel zurückgeführt werden, da diese in der Oberdehnung enthalten sind. Zusätzlich geht jedoch noch der elastische Dehnungsanteil ε_{el}^d ein. Die Verkleinerung des Gefälles der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase infolge der Verkleinerung der bezogenen Oberspannung bedeutet eine geringere Steifigkeitsabnahme pro Lastwechsel und damit eine geringere Zunahme der elastischen Dehnung ε_{el}^d pro Lastwechsel. Da die Belastungsgeschwindigkeit bei den untersuchten Oberspannungsunterschieden, aber gleichen Belastungsfrequenzen wenig beeinflusst wird, kann somit gleichzeitig von einer verringerten Steifigkeitsdegradation pro Lastwechsel infolge der Verkleinerung der bezogenen Oberspannung und damit von einer geringeren Zunahme der elastischen Dehnung ausgegangen werden.

Die kleinere Steigung in der zweiten Phase der Oberdehnungsentwicklung bei kleineren bezogenen Oberspannungen ist also einerseits auf eine geringere Zunahme der bleibenden Dehnung und andererseits auf eine geringere Zunahme der elastischen Dehnung zurückzuführen.

Betrachtung des Dehnungszuwachses am Phasenübergang II/III (Modellebene „Ermüdungsprozess“)

Die systematische Auswertung der Dehnungsentwicklungen hat gezeigt, dass die Unterdehnung am Phasenübergang II/III für niedrigere Beanspruchungsniveaus größer ist (vgl. Abbildung 6.24). Bis zum Erreichen des Phasenübergangs II/III werden also in Abhängigkeit von der bezogenen Oberspannung unterschiedlich große bleibende Dehnungen akkumuliert. Das bedeutet, dass trotz geringerer Zunahme der bleibenden Dehnung pro Lastwechsel (siehe zuvor) die höhere Anzahl an Lastwechseln bzw. die längere Dauer der Belastung bis zum Erreichen des Phasenübergangs zu insgesamt größeren Unterdehnungen bzw. bleibenden Dehnungen führt.

Die Differenz der Ober- und Unterdehnungen am Phasenübergang II/III, und damit die elastische Dehnung ε_{el}^d , ist für niedrigere Oberspannungsniveaus tendenziell kleiner (vgl. Abbildung 6.26). Dieses kann auf die kleinere Spannungsamplitude bei niedrigerer Beanspruchung zurückgeführt werden. Gleichzeitig ist die Steifigkeit am Phasenübergang für niedrigere Oberspannungsniveaus kleiner (vgl. Abbildung 6.34), was aufgrund der gleichzeitig kleineren Steifigkeitsabnahme pro Lastwechsel (siehe zuvor) auf die höhere Anzahl Lastwechsel bis zu dem Phasenübergang zurückzuführen ist. Eine kleinere Steifigkeit führt bei gleicher Beanspruchungshöhe zu einem größeren elastischen Dehnungsanteil bei Oberspannung. Die elasti-

sche Dehnung am Phasenübergang ergibt sich also aufgrund kleinerer Dehnung infolge der niedrigeren Beanspruchungshöhe in Kombination mit größerer Dehnung infolge kleinerer Steifigkeit. Insgesamt überwiegt der Einfluss der niedrigeren Beanspruchungshöhe und es ergibt sich eine kleinere elastische Dehnung ε_{el}^d für niedrigere bezogene Oberspannungen.

Der prozentuale Steifigkeitsverlust in Phase II bezogen auf die Ausgangssteifigkeit im ersten Lastwechsel ist bei niedrigeren Oberspannungsniveaus nur größtenteils, und nicht bei allen Versuchsserien, größer (vgl. Abbildung 6.35).

Hinsichtlich des Degradationsgrads sind die Untersuchungsergebnisse damit nicht eindeutig. Es kann jedoch der logische Zusammenhang gelten: Eine kleinere Oberspannung führt zu einer größeren Lastwechselzahl am Phasenübergang, führt zu einer größeren bleibenden Dehnung und zu einer größeren Steifigkeitsdegradation.

Überblick über die Ergebnisse (beide Modellebenen)

Infolge niedrigerer Oberspannungsniveaus

- werden pro Lastwechsel kleinere plastische und visko-elastische Dehnungsanteile akkumuliert,
- tritt pro Lastwechsel eine niedrigere Steifigkeitsabnahme auf,
- erfolgt ein niedrigerer Zuwachs an elastischer Dehnung pro Lastwechsel infolge niedrigerer Steifigkeitsabnahme,
- ist der bleibende Dehnungsanteil an den Phasenübergängen größer,
- ist die Steifigkeit an den Phasenübergängen kleiner,
- ist die elastische Dehnung an den Phasenübergängen aufgrund des niedrigeren Beanspruchungsniveaus trotzdem kleiner,
- kann an den Phasenübergängen ein höherer Degradationsgrad erreicht sein.

10.4.4 Einfluss der Belastungsfrequenz

Beim Wechsel der Belastungsfrequenz bleiben die bezogene Oberspannung sowie die Wellenform unverändert (vgl. Abbildung 6.3). Die Dehnungen bei Oberspannung treten also bei dem gleichen Spannungsniveau auf. Die Belastungsgeschwindigkeit im Lastwechsel steigt infolge der Erhöhung der Belastungsfrequenz. Die Anzahl Lastwechsel pro Zeiteinheit ist bei höherer Belastungsfrequenz größer. Die Dauer eines Lastwechsels ist dementsprechend bei höherer Belastungsfrequenz kleiner.

*Betrachtung des Dehnungszuwachses im Lastwechsel
(Modellebene „Lastwechsel“)*

Die systematische Auswertung der Dehnungsentwicklungen hat gezeigt, dass die Steigungen der Dehnungsentwicklungen bei Oberspannung und Unterspannung bezogen auf die Lastwechselzahl $\bar{\varepsilon}_{O,N}^{\text{II}}$ und $\bar{\varepsilon}_{U,N}^{\text{II}}$ bei höherer Belastungsfrequenz kleiner sind (vgl. Abbildung 6.30 und Abbildung A 3.18). Dagegen sind die Steigungen der Dehnungsentwicklungen bei Oberspannung und Unterspannung bezogen auf die Belastungsdauer $\bar{\varepsilon}_{O,t}^{\text{II}}$ und $\bar{\varepsilon}_{U,t}^{\text{II}}$ (vgl. Abbildung 6.31 bzw. Abbildung A 3.19) für höhere Belastungsfrequenzen größer. Der Zuwachs der Unterdehnung sowie der Zuwachs der Oberdehnung sind somit pro Lastwechsel kleiner, pro Zeiteinheit dagegen größer. Die Differenz der Steigungen bei Ober- und Unterdehnung bezogen auf die Lastwechselzahl ist für höhere Belastungsfrequenzen kleiner (vgl. Abschnitt 6.5.6, Tabelle 6.6 bzw. Tabelle 6.7). Das heißt, dass die elastische Dehnung $\varepsilon_{\text{el}}^{\text{d}}$ pro Lastwechsel weniger ansteigt.

Infolge Frequenzerhöhung verkleinert sich gleichzeitig das Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase bezogen auf die Lastwechselzahl $\bar{E}_{S,N}^{\text{II}}$ (vgl. Abbildung 6.36). Wird das Gefälle der Steifigkeitsentwicklung bezogen auf die Belastungsdauer betrachtet, führen höhere Belastungsfrequenzen zu größeren Gefällen $\bar{E}_{S,t}^{\text{II}}$ (vgl. Abbildung A 3.22). Das heißt, bei höheren Belastungsfrequenzen ist die sichtbare Steifigkeitsabnahme pro Lastwechsel kleiner. Pro Zeiteinheit ist die sichtbare Steifigkeitsabnahme dagegen bei höheren Belastungsfrequenzen größer.

Im Folgenden wird zunächst der niedrigere Zuwachs an Unterdehnung bzw. an bleibender Dehnung ($\varepsilon_{\text{pl}} + \varepsilon_{\text{v-el}}$) pro Lastwechsel betrachtet.

Zyklische Beanspruchungen verschiedener Frequenzen unterscheiden sich wesentlich in den Wirkungsauern unterschiedlicher Beanspruchungshöhen im Lastwechsel. Aufgrund der Symmetrie des Beanspruchungsverlaufs zur Mittellage sind die relativen Wirkungsauern hoher und niedriger Beanspruchungen jeweils gleich groß, wobei auch die Ober- und Unterspannungsniveaus gleich sind. Ergibt sich pro Lastwechsel, und damit auch für eine kürzere Zeiteinheit, ein kleinerer Zuwachs an bleibenden Dehnungen, muss dieses somit auf die unterschiedliche, zeitabhängige Ausprägung des Kriechens und Rückkriechens in diesem extrem kurzen Zeitraum zurückgeführt werden können.

In Abbildung 10.4 ist die Dehnungs-Zeit-Funktion für zwei konstante Belastungen gleicher Beanspruchungshöhe aber unterschiedlicher Dauer dargestellt. Elastische Dehnungsanteile sind auch hier nicht dargestellt, da sie im Rahmen der Modellvorstellung der elastischen Dehnung $\varepsilon_{\text{el}}^{\text{d}}$ zugeordnet werden.

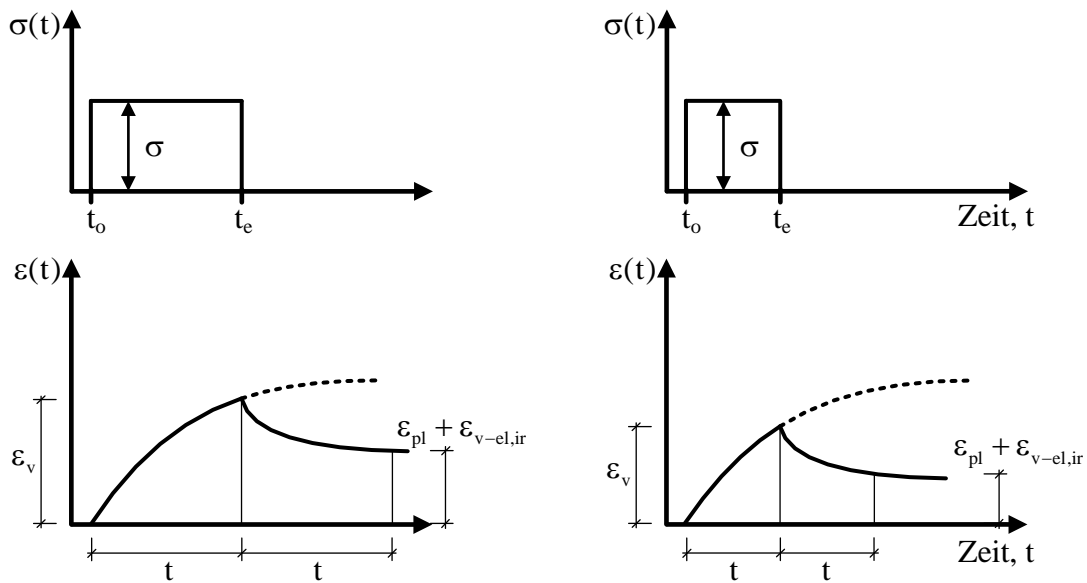


Abbildung 10.4: Verlauf viskoser Dehnungen bei konstanter Beanspruchung mit unterschiedlicher Dauer (schematisch)

Aufgrund der gleichen Spannungsdifferenz bei Belastung verläuft der Anstieg der viskosen Dehnung gleich. Bei kürzerer Belastungsdauer ist die viskose Dehnung zum Zeitpunkt der Entlastung jedoch kleiner als bei längerer Beanspruchung. Für den Verlauf des Rückkriechens in einem extrem kurzen Zeitraum nach Entlastung wird angenommen, dass dieser weniger durch die vorangegangene Belastungsdauer, sondern eher durch die Spannungsdifferenz bei Entlastung beeinflusst wird. Die Spannungsdifferenz ist in dem betrachteten Fall aufgrund gleicher Ober- und Unterspannungen gleich groß. Es wird insofern von einem gleichen Verlauf des Rückkriechens ausgegangen.

Somit würde bei kürzerer Beanspruchung und theoretischem vollständigem Rückgang der viskoelastischen Dehnung eine kleinere plastische Dehnung bleiben, was für eine kürzere Beanspruchungsdauer plausibel ist. Für eine kürzere Beanspruchungs- und Ruhephase würden sich nach dieser Vorstellung kleinere bleibende Dehnungen ergeben.

Wird diese Vorstellung auf die Be- und Entlastungsphasen bei Ermüdungsbeanspruchung übertragen, entstehen bei höheren Frequenzen pro Lastwechsel tatsächlich weniger bleibende Dehnungen ($\varepsilon_{pl} + \varepsilon_{v-el}$). Die Abnahme der Steigung der Unterdehnungsentwicklung bezogen auf die Lastwechselzahl bei höheren Belastungsfrequenzen kann somit mit der verminderten Entstehung bleibender Dehnungen im Lastwechsel in Zusammenhang gebracht werden. Die Steigung der Unterdehnungsentwicklung im Bezug zur Belastungsdauer ist jedoch gleichzeitig für höhere Belastungsfrequenzen größer. Das heißt, der Zuwachs an bleibender Dehnung ist bei höheren Belastungsfrequenzen pro Lastwechsel zwar kleiner, pro Zeiteinheit aber größer.

Wird eine bestimmte Zeitdauer betrachtet, so ist die Anzahl der in dieser Zeitdauer stattfindenden Lastwechsel von der Frequenz abhängig. Bei höherer Frequenz finden mehr Lastwechsel statt als bei einer niedrigeren Frequenz. Dabei entspricht das Verhältnis der Dauer der Lastwechsel dem reziproken Wert des Verhältnisses der Frequenzen. Das heißt, die Dauer eines Lastwechsels wird um den gleichen Faktor verkleinert wie die Frequenz erhöht wird. Wäre der Anstieg der bleibenden Dehnung im Lastwechsel proportional zur Dauer des Lastwechsels, würde sich in der gleichen Zeiteinheit bei unterschiedlichen Anzahlen an Lastwechseln infolge unterschiedlicher Frequenzen die gleiche bleibende Dehnungszunahme ergeben.

Wie zuvor beschrieben wurde, ist dieses jedoch nicht der Fall. Infolge der Frequenzerhöhung wird der Zuwachs an bleibender Dehnung ($\epsilon_{pl} + \epsilon_{v-el}$) im Lastwechsel weniger stark verkleinert als die Belastungsdauer im Lastwechsel. Es ist daher insgesamt davon auszugehen, dass der Anstieg der bleibenden Dehnung im Lastwechsel überproportional zur Dauer des Lastwechsels verläuft, wie in Abbildung 10.5 dargestellt ist. Dieser überproportionale Anstieg der bleibenden Dehnungen kann dabei auch mit dem größeren Dehnungszuwachs infolge einer (vorherigen) höheren Belastungsgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 7.5) in Verbindung stehen. Der Frequenzeinfluss bei Ermüdungsbeanspruchung steht somit mit dem überproportionalen Anstieg bleibender Dehnungen im Lastwechsel in Zusammenhang.

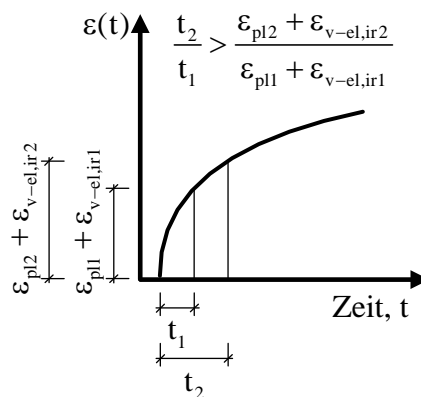


Abbildung 10.5: Anstieg der bleibenden Dehnungen im Lastwechsel (schematisch)

Die Verkleinerung der Steigung der Oberdehnungsentwicklung bezogen auf die Lastwechselzahl infolge höherer Belastungsfrequenz kann teilweise auf den niedrigeren Zuwachs an bleibender Dehnung zurückgeführt werden. Gleichzeitig ist jedoch auch die Differenz der Steigungen der Ober- und Unterdehnung bezogen auf die Lastwechselzahl sowie das Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase kleiner. Dies bedeutet, dass auch die Zunahme des elastischen Dehnungsanteils ϵ_{el}^d pro Lastwechsel sowie die Abnahme der Steifigkeit bei höheren Belastungsfrequenzen niedriger sind.

Die niedrigere Zunahme des elastischen Dehnungsanteils ϵ_{el}^d bzw. das kleinere Steifigkeitsgefälle bei höheren Belastungsfrequenzen kann einerseits auf eine weniger stark voranschreiten-

de Steifigkeitsabnahme hindeuten. Andererseits kann dieses jedoch auch bedeuten, dass die Abnahme der Steifigkeit bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten nur weniger sichtbar ist.

Ein Hinweis auf ein mögliches Vorhandensein eines Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die sichtbare Steifigkeitsabnahme kann anhand einer vergleichenden Betrachtung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit bei monoton steigender Beanspruchung bei normalfesten und hochfesten Betonen abgeleitet werden.

Das Materialverhalten normalfester Betone wird stärker durch die Belastungsgeschwindigkeit beeinflusst, die Steifigkeit durch höhere Belastungsgeschwindigkeiten stärker vergrößert (vgl. Abschnitt 2.1.3). Gleichzeitig ist die Steifigkeit normalfester Betone bei gleicher Belastungsgeschwindigkeit kleiner als die Steifigkeit hochfester Betone. Es ergibt sich also für kleinere Steifigkeiten eine größere Erhöhung der Steifigkeit bei der gleichen Belastungsgeschwindigkeitssteigerung. Für höhere Belastungsgeschwindigkeiten nähern sich folglich die bei niedrigeren Belastungsgeschwindigkeiten vorhandenen unterschiedlichen Steifigkeiten an. Unterschiede der Steifigkeiten zeigen sich bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten weniger stark.

Es ist insofern denkbar, dass sich die Abnahme der Steifigkeit pro Lastwechsel bei höheren Belastungsfrequenzen bzw. -geschwindigkeiten weniger stark zeigt. In diesem Fall wären die Steifigkeitsgefälle bei unterschiedlichen Belastungsfrequenzen nicht vergleichbar. Würde diese These zutreffen, könnten anhand des Vergleichs der Gefälle der Steifigkeitsentwicklungen bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten keine verlässlichen Rückschlüsse auf die relative Steifigkeitsabnahme im Lastwechsel gezogen werden.

Betrachtung des Dehnungszuwachses am Phasenübergang II/III (Modellebene „Ermüdungsprozess“)

Die systematische Auswertung der Dehnungsentwicklungen hat ergeben, dass die Oberdehnung und die Unterdehnung am Phasenübergang II/III für höhere Belastungsfrequenzen kleiner sind. Die kleineren Unterdehnungen bzw. kleineren bleibenden Dehnungen am Phasenübergang II/III sind auf die kürzeren Belastungsdauern bis zum Phasenübergang zurückzuführen. Bis zu den Phasenübergängen werden also abhängig von der Belastungsfrequenz unterschiedlich große bleibende Dehnungen akkumuliert.

Die Differenz zwischen Ober- und Unterdehnung ist bei höheren Belastungsfrequenzen zum überwiegenden Teil kleiner als bei niedrigeren Belastungsfrequenzen (vgl. Abbildung 6.26). Hiermit übereinstimmend ist die Steifigkeit am Phasenübergang für höhere Belastungsfrequenzen größer (vgl. Abbildung 6.34). Gleichzeitig ist jedoch auch der prozentuale Steifigkeitsverlust in Phase II bezogen auf die Ausgangssteifigkeit für höhere Belastungsfrequenzen größer (vgl. Abbildung 6.35). Zwischen der Steifigkeit und dem prozentualen Steifigkeitsverlust besteht somit ein Scheinwiderspruch.

Die größere Steifigkeit am Phasenübergang bei höherer Belastungsfrequenz ist ähnlich wie bei monoton steigender Beanspruchung auf die höhere Belastungsgeschwindigkeit zurückführbar. Als Folge ist die Dehnungsdifferenz bzw. die elastische Dehnung ε_{el}^d bei höheren Belastungsfrequenzen kleiner, als bei niedrigeren Belastungsfrequenzen. Der größere prozentuale Steifigkeitsverlust in Phase II zeigt jedoch, dass der Degradationsgrad für höhere Belastungsfrequenzen zu diesem „Zeitpunkt“ des Ermüdungsprozesses größer ist als bei niedrigeren Belastungsfrequenzen. Gleichzeitig ist auch die Lastwechselzahl am Phasenübergang II/III bei höheren Belastungsfrequenzen größer, was zu einem größeren prozentualen Steifigkeitsverlust führen kann.

Bei Versuchen mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten stehen größere Steifigkeiten also nicht zwangsläufig mit einem weniger geschädigten Gefügestand in Zusammenhang. Der größere prozentuale Steifigkeitsverlust bei höheren Belastungsfrequenzen weist im Gegenteil eher auf einen höheren Degradationsgrad hin.

Die vorherigen Erläuterungen zeigen, dass eine abschließende vergleichende Beurteilung des Gefügestands nach vorheriger Belastung mit unterschiedlichen Belastungsfrequenzen nur möglich ist, wenn die Steifigkeiten zum betrachteten „Zeitpunkt“ bei gleichen Belastungsgeschwindigkeiten festgestellt werden. Der unterschiedlich große prozentuale Steifigkeitsverlust bei verschiedenen Belastungsfrequenzen ist jedoch ein Hinweis darauf, dass am Phasenübergang unterschiedliche Gefügestände vorliegen könnten.

Überblick über die Ergebnisse (beide Modellebenen)

Infolge erhöhter Belastungsfrequenzen

- werden pro Lastwechsel kleinere plastische und visko-elastische Dehnungsanteile akkumuliert,
- ist die sichtbare Steifigkeitsabnahme pro Lastwechsel kleiner, was im Fall einer Abhängigkeit der sichtbaren Steifigkeitsabnahme von der Belastungsgeschwindigkeit keine Aussage über die tatsächliche Steifigkeitsabnahme zulassen würde,
- erfolgt ein geringerer Zuwachs an elastischer Dehnung pro Lastwechsel,
- ist der bleibende Dehnungsanteil an den Phasenübergängen kleiner,
- ist die sichtbare Steifigkeit an den Phasenübergängen größer und dementsprechend die elastische Dehnung an den Phasenübergängen kleiner,
- ist an den Phasenübergängen trotzdem ein höherer Degradationsgrad erreicht.

10.5 Übertragung der Modellvorstellung auf den Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung

Die zuvor auf die Ermüdungsversuche angewandte Modellvorstellung soll im Folgenden auf den Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung übertragen werden. Dabei wird die Modellebene des Beanspruchungsprozesses betrachtet (Abbildung 10.2).

Es wird davon ausgegangen, dass die für die Beschreibung der Gesamtdehnung unter Ermüdungsbeanspruchung berücksichtigten Dehnungsanteile auch bei Dauerstandbeanspruchung auftreten, jedoch in unterschiedlicher Ausprägung. Für die vergleichende Anwendung der Modellvorstellung auf die Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung werden Versuche mit gleichem Beanspruchungsniveau $S_O = S_D = 0,90$ betrachtet (vgl. Abschnitt 8.3), wobei im zyklischen Fall die Oberdehnung berücksichtigt wird. Ferner werden die Dehnungsentwicklungen in der zweiten Phase betrachtet. Der Unterschied zwischen beiden Beanspruchungen besteht somit in den Be- und Entlastungsphasen bei Ermüdungsbeanspruchung.

In Abschnitt 8.3 wurde beschrieben, dass die Dehnungen an den Phasenübergängen bei zyklischer Beanspruchung kleiner als bei Dauerstandbeanspruchung gleicher Beanspruchungshöhe sind. Des Weiteren wurde bei zyklischer Beanspruchung eine kürzere Belastungsdauer bis zu den Phasenübergängen sowie eine kürzere Belastungsdauer bis zum Versagen festgestellt. Die Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase bezogen auf die Belastungsdauer $\bar{\varepsilon}_{O,t}^{\text{II}}$ bzw. $\bar{\varepsilon}_{D,t}^{\text{II}}$ ist für die zyklische Beanspruchung größer als bei Dauerstandbeanspruchung. Pro Zeiteinheit steigt die Gesamtdehnung ($\varepsilon_{\text{pl}} + \varepsilon_{\text{v-el}} + \varepsilon_{\text{el}}^{\text{d}}$) bei zyklischer Beanspruchung damit stärker an als bei Dauerstandbeanspruchung. Als ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung wurde festgestellt, dass die Steigungen der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase, die Dehnungen an den Phasenübergängen und die Bruchdehnungen bei Dauerstandbeanspruchung wesentlich stärker von der tatsächlichen Beanspruchungshöhe und der Belastungsdauer abhängig sind als bei zyklischer Beanspruchung.

Bei gleichen Beanspruchungsniveaus stellen sich plastische Dehnungen in Abhängigkeit von der Dauer der Beanspruchung ein. Bei zyklischer Beanspruchung ist die für die Entstehung plastischer Dehnungen relevante Dauer (Wirkungsdauer hoher Beanspruchungen) aufgrund der kontinuierlich auftretenden Be- und Entlastungsphasen gegenüber der Gesamtversuchsdauer deutlich kürzer. Somit ist der Anstieg der plastischen Dehnungsanteile pro Zeiteinheit bei zyklischer Beanspruchung kleiner als bei Dauerstandbeanspruchung. Die plastischen Dehnungen sind bei gleicher Belastungsdauer und gleichem Beanspruchungsniveau bei zyklischer Beanspruchung immer kleiner als bei Dauerstandbeanspruchung. Hinzu kommt, dass

die Dauer bis zum Erreichen der Phasenübergänge bei zyklischer Beanspruchung kürzer ist als bei Dauerstandbeanspruchung gleicher Höhe. Daraus folgt, dass die absoluten plastischen Dehnungen an den Phasenübergängen bei zyklischer Beanspruchung kleiner als bei Dauerstandbeanspruchung sind.

Der visko-elastische Dehnungsanteil entwickelt sich bei Dauerstandbeanspruchung kontinuierlich mit fortschreitender Belastungsdauer. Dagegen akkumulieren sich bei zyklischer Beanspruchung die irreversiblen visko-elastischen Dehnungen über die Lastwechsel. Aufgrund der Entlastungsvorgänge sowie aufgrund der kürzeren Dauer bis zu den Phasenübergängen ist davon auszugehen, dass der visko-elastische Dehnungsanteil an den Phasenübergängen bei zyklischer Beanspruchung ebenfalls kleiner als bei Dauerstandbeanspruchung ist. Insgesamt betrachtet, kann das Eintreten der Phasenübergänge nicht auf eine bestimmte Größe der plastischen Dehnung und der visko-elastischen Dehnung zurückgeführt werden.

Zusätzlich verändert sich bei zyklischer Beanspruchung der elastische Dehnungsanteil ε_{el}^d infolge der degradierten Steifigkeit. Auch bei Dauerstandbeanspruchung existiert ein entsprechender elastischer Dehnungsanteil, wie an der elastischen Rückverformung bei Entlastung zu sehen ist (vgl. Abbildung 7.6). Auch hier verändert sich der elastische Dehnungsanteil ε_{el}^d infolge der Dauerstandbeanspruchung im Verlauf der Belastung.

Wie zuvor erläutert wurde, ist der Anstieg der plastischen und der visko-elastischen Dehnung bei zyklischer Beanspruchung pro Zeiteinheit kleiner als bei Dauerstandbeanspruchung. Trotzdem ist der Gesamtdehnungszuwachs pro Zeiteinheit bei zyklischer Beanspruchung größer, was an der größeren Steigung der Dehnungsentwicklung erkennbar ist (vgl. Abschnitt 8.3). Somit muss eine stärkere Abnahme der Steifigkeit pro Zeiteinheit bei zyklischer Beanspruchung stattfinden als bei Dauerstandbeanspruchung, so dass es pro Zeiteinheit zu einer stärkeren Erhöhung des elastischen Dehnungsanteils ε_{el}^d bei zyklischer Beanspruchung kommt. Die elastischen Dehnungsanteile ε_{el}^d entwickeln sich im Verlauf der Beanspruchung trotz des gleichen Beanspruchungsniveaus aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchungsart somit unterschiedlich. Infolge der Be- und Entlastungsvorgänge bei zyklischer Beanspruchung erfolgt eine stärkere Degradation der Steifigkeit pro Zeiteinheit als bei Dauerstandbeanspruchung (zyklischer Effekt).

An den Phasenübergängen sind die plastischen und irreversiblen visko-elastischen Dehnungsanteile bei zyklischer Beanspruchung kleiner. Insofern ist darauf zu schließen, dass unterschiedliche Gefügestände vorliegen. Zusätzlich wurde eine stärkere Steifigkeitsdegradation pro Zeiteinheit bei gleichzeitig kürzere Belastungsdauer bis zum Phasenübergang festgestellt. Hieraus lässt sich noch keine eindeutige Relation der Steifigkeitsdegradation am Phasenübergang II/III für beide Beanspruchungsarten ableiten. Aufgrund der unterschiedlichen plastischen und visko-elastischen Dehnungen sowie unter Berücksichtigung der Hinweise auf unterschiedliche Steifigkeiten bzw. Degradationsgrade (Abschnitt 10.4.3 bzw. 10.4.4) am Phasenübergang bei verschiedenen zyklischen Beanspruchungen ist aber davon auszugehen,

dass die Phasenübergänge infolge Dauerstandbeanspruchung und zyklischer Beanspruchung abhängig von der Belastungsfrequenz (und der Wellenform) bei unterschiedlichen degradierten Steifigkeiten eintreten.

Diese Ergebnisse werden durch die Erkenntnisse von [Diaz / Hilsdorf – 1971] gestützt, die bei zyklischer Beanspruchung gegenüber Dauerstandbeanspruchung einen stärkeren Anstieg der Rissdichte vor dem Versagen feststellten. Sie berichten über unterschiedliche Risskonfigurationen, die zum Versagen führen. Auch die Ergebnisse von [Shah / Chandra – 1970] stützen die These unterschiedlicher Gefügestände. Sie stellten in ihren vergleichenden Untersuchungen fest, dass die Be- und Entlastungsprozesse zyklischer Beanspruchungen gegenüber Dauerstandbeanspruchungen zusätzliche Risse hervorrufen.

Insgesamt kann geschlussfolgert werden, dass sich die Phasenübergänge und das Versagen in Abhängigkeit von der Entwicklung der Dehnungsanteile und der Degradation der Steifigkeit nach unterschiedlicher Beanspruchungsdauer und bei unterschiedlichen Dehnungen einstellen. Bei anderen zyklischen Beanspruchungen, z. B. anderer Belastungsfrequenz, und Dauerstandbeanspruchung gleicher Beanspruchungshöhe sind aufgrund der unterschiedlichen Ausprägung der Dehnungsanteile und der Steifigkeitsdegradation mit der Beanspruchungsdauer daher auch unterschiedliche Verhältnisse der Bruchdehnungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung möglich. Die Dehnungsentwicklungen bei zyklischen Beanspruchungen sind weniger abhängig von der Beanspruchungshöhe und Beanspruchungsdauer als bei Dauerstandbeanspruchung, da der zeitliche Effekt durch den zyklischen Effekt überlagert wird.

10.6 Ableitung einer Hypothese zu Gefügeständen

Die Phasenübergänge der Dehnungsentwicklungen stellen markante „Zeitpunkte“ bei Ermüdungsbeanspruchungen und Dauerstandbeanspruchung dar. Sie markieren die Änderungen der Mikrorissentstehung und Mikrorissausbereitung (vgl. z. B. [Klausen – 1978]).

Die Auswertungen der zyklischen Dehnungsentwicklungen unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Modellvorstellung zeigen, dass die im Ermüdungsprozess akkumulierte Summe aus plastischer und irreversibler visko-elastischer Dehnung an den Phasenübergängen unterschiedlich groß ist. Auch bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung sind die plastischen und visko-elastischen Dehnungsanteile an den Phasenübergängen unterschiedlich groß. Das Eintreten der Phasenübergänge kann somit nicht auf die Größe dieser Dehnungsanteile zurückgeführt werden.

Die sichtbare Steifigkeit an den Phasenübergängen ist abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit, sodass Vergleiche bei verschiedenen Belastungsfrequenzen schwer möglich sind. Bei höheren Belastungsfrequenzen sind an den Phasenübergängen zwar größere Steifigkeiten vor-

handen, diese sind jedoch auf die erhöhte Belastungsgeschwindigkeit zurückzuführen. Es konnte in diesem Zusammenhang anhand des prozentualen Steifigkeitsverlusts in Phase II jedoch gezeigt werden, dass trotz der größeren Steifigkeit von einem höheren Degradationsgrad am Phasenübergang bei höherer Belastungsfrequenz auszugehen ist (Abschnitt 10.4.4). Für unterschiedliche bezogene Oberspannungen, bei deren Änderung die Belastungsgeschwindigkeit weniger stark beeinflusst wird, zeigten sich ebenfalls unterschiedliche Steifigkeiten an den Phasenübergängen.

Anhand des Vergleichs der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung konnten Hinweise abgeleitet werden, dass ebenfalls unterschiedliche degradierte Steifigkeiten an den Phasenübergängen vorliegen. Somit kann insgesamt geschlossen werden, dass sich die Phasenübergänge bei unterschiedlichen degradierten Steifigkeiten einstellen. Das Eintreten der Phasenübergänge ist somit auch nicht auf eine bestimmte degradierte Steifigkeit zurückzuführen.

Es wird daher vermutet, dass parallel zur Entwicklung plastischer Dehnungen eine Entwicklung struktureller Veränderungen des Gefüges auf einer sehr kleinen Skalenebene stattfindet, deren Ausprägung sich in Abhängigkeit von der zyklischen Beanspruchung im Ermüdungsprozess einstellt. Diese Kleinst-Gefügeveränderungen werden als Randbedingung bzw. Vorstufe für die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen aufgefasst und beeinflussen damit das Eintreten der drei Phasen. Die Art der Kleinst-Gefügeveränderungen ist abhängig von der zyklischen Beanspruchung bzw. von der Beanspruchungsart und anhand unterschiedlicher Steifigkeitsabnahmen und Steifigkeiten sichtbar.

So könnten die Kleinst-Gefügeveränderungen beispielsweise bei zyklischer Beanspruchung feiner und gleichmäßiger verteilt sein als bei Dauerstandbeanspruchung und auf einer größeren Skalenebene zu zusätzlichen Rissen bzw. zu einem stärkeren Anstieg der Rissdichte beim Versagen führen, wie von [Shah / Chandra – 1970] bzw. [Diaz / Hilsdorf – 1971] festgestellt wurde. Bei zyklischen Beanspruchungen mit höheren Belastungsfrequenzen sind feinere Kleinst-Gefügeveränderungen, die gleichmäßiger verteilt sind, denkbar als bei niedrigeren Belastungsfrequenzen.

Die strukturellen Kleinst-Gefügeveränderungen beeinflussen ferner die Entstehung der plastischen Dehnungen. Die unterschiedliche Ausprägung dieser strukturellen Veränderungen des Gefüges auf einer sehr kleinen Skalenebene führen dazu, dass die Phasenübergänge, und damit die Änderung der auf einer größeren Skalenebene stattfindenden Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen, bei unterschiedlichen Dehnungen und Steifigkeiten eintreten können. Da die Mikrorissentstehung und Mikrorissausbreitung durch die strukturellen Kleinst-Gefügeveränderungen beeinflusst werden ist zu vermuten, dass auch die Bruchdehnung und das Versagen unmittelbar beeinflusst sind.

10.7 Zusammenfassung und Beurteilung

Zur Übertragung der Untersuchungsergebnisse in eine Modellvorstellung wurden zwei Modellansätze zur Beschreibung des Dehnungsverhaltens bei Druckschwellbeanspruchung aus der Literatur kombiniert, angepasst sowie hinsichtlich der Entstehung zeitabhängiger Dehnungen im Lastwechsel erweitert. Die Modellvorstellung beinhaltet Dehnungsanteile, die einerseits anhand der im Ermüdungsversuch erfassbaren Dehnungsentwicklungen beschrieben werden können, und die andererseits die Berücksichtigung der baustofflich bedingten beanspruchungshöhen-, zeit- und geschwindigkeitsabhängige Entstehung von Dehnungen ermöglichen. Mit dieser Herangehensweise können sowohl die baustofflichen Phänomene als auch die Akkumulation der Dehnungen über den Ermüdungsprozess beschrieben werden.

Die bleibenden Dehnungen mit plastischen und irreversiblen visko-elastischen Anteilen werden im Rahmen dieser Modellvorstellung als zeitabhängig und beanspruchungsabhängig angenommen. Sie stehen damit mit dem in der Literatur beschriebenen zeitlichen Effekt in Zusammenhang. Dieser zeitliche Effekt steht jedoch auch gleichzeitig mit der Belastungsgeschwindigkeit im Zusammenhang. Die elastische Dehnung ϵ_{el}^d und die Steifigkeit werden als hauptsächlich durch den zyklischen Effekt beeinflusste Größen angesehen. Der zyklische Effekt wird durch die Be- und Entlastungsvorgänge hervorgerufen und steht gleichzeitig ebenfalls mit der Belastungsgeschwindigkeit im Zusammenhang.

Es wurde anhand der Versuchsergebnisse gezeigt, dass bei der vergleichenden Beurteilung von Steifigkeiten und der Steifigkeitsdegradationen insbesondere die Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit berücksichtigt werden muss. Die im Versuch sichtbare Steifigkeit bzw. Steifigkeitsdegradation kann nicht ohne Weiteres zwischen Versuchen mit unterschiedlichen Belastungsfrequenzen verglichen werden.

Es wurde gezeigt, dass die Modellvorstellung als Basis für die Beurteilung der baustofflichen Phänomene bei unterschiedlichen zyklischen Beanspruchungen und Beanspruchungsarten grundsätzlich geeignet ist. Wünschenswert wäre jedoch ein geschlossener Modellansatz, für dessen Entwicklung aber momentan noch grundlegendes Wissen fehlt. So sind für die Beschreibung zeit- und beanspruchungshöhenabhängiger Verformungen in den extrem kurzen Zeiträumen im Lastwechsel weitergehende Untersuchungen und Modelle erforderlich sind.

Ferner wurde gezeigt, dass Rückschlüsse auf die Gefügestände an den Phasenübergängen aufgrund der teilweise vorhandenen unmittelbaren Beeinflussung der Dehnungen und Steifigkeiten durch die untersuchten Belastungsparameter schwierig sind. Es konnten jedoch, auch auf Basis Beanspruchungsart-übergreifender Analysen der Dehnungen und Steifigkeiten, Hinweise auf das Vorhandensein unterschiedlicher Gefügestände bzw. Mikrorisszustände abgeleitet werden.

Ausgehend von dieser Erkenntnis wurde die Hypothese aufgestellt, dass bei der Beanspruchung von Betonen, parallel zur Entstehung plastischer Dehnungen strukturelle Veränderun-

gen des Gefüges auf einer sehr kleinen Skalenebene stattfinden, deren Ausprägung sich in Abhängigkeit von der zyklischen Beanspruchung und Beanspruchungsart einstellt. Diese Kleinst-Gefügeveränderungen stellen die Randbedingung bzw. eine Art Vorstufe dar, für die auf einer größeren Skalenebene stattfindende Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen. Sie sind die Ursache dafür, dass die Phasenübergänge der Dehnungsentwicklungen bei unterschiedlichen Dehnungen und Steifigkeiten bei gleichzeitig einheitlicher Änderung der Risscharakteristik eintreten. Diese Hypothese sollte mithilfe von gefügeorientierten Untersuchungsmethoden überprüft und die Hintergründe der Entstehung unterschiedlicher Gefügestände weitergehend untersucht und beschrieben werden.

Die Modellvorstellung wurde auf Versuchsergebnisse eines hochfesten Betons angewendet. Sie ist jedoch auf Betone anderer Festigkeiten übertragbar, da die Entwicklung und Akkumulation der berücksichtigten Dehnungsanteile auch bei Betonen anderer Festigkeiten prinzipiell gleich stattfindet. Die Größe der Dehnungsanteile ist jedoch bei Betonen verschiedener Festigkeiten in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften unterschiedlich [Gaede – 1962].

Es wurde gezeigt, dass zeitliche und zyklische Effekte den Gefügestand von Betonen und sich gegenseitig beeinflussen. Übertragen auf Bauwerke bedeutet dies, dass eine Überlagerung aus konstanten Beanspruchungen und zyklischen Beanspruchungen zu anderen Dehnungsentwicklungen führen kann als sie sich aus der reinen Addition der Dehnungsentwicklungen der einzelnen Beanspruchungsarten ergeben würden. Auch Reihenfolgeeffekte bei verschiedenen zyklischen Beanspruchungen sind vor dem Hintergrund zeitlicher und zyklischer Effekte auf den Gefügestand im Ermüdungsprozess zu betrachten, um besser geeignete Ansätze zur Beschreibung der Schadensakkumulation in Betonen zu entwickeln, als die lineare Schadenakkumulationshypothese nach *Palmgren-Miner*.

Kapitel 11

Zusammenfassung und Ausblick

11.1 Zusammenfassung

Die Weiterentwicklungen in der Betontechnologie der letzten Jahrzehnte ermöglichen die Realisierung schlanker Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen, für die der Ermüdungsnachweis aufgrund ihrer erhöhten Schwingungsanfälligkeit bemessungsrelevant wird. Der Ermüdungsnachweis wurde seit den 1980er Jahren kaum weiterentwickelt und beinhaltet immer noch sehr grobe Herangehensweisen bei der Berücksichtigung des Materialwiderstands von Betonen. Die Umsetzung innovativer betontechnologischer und konstruktiver Lösungen wird hierdurch behindert. Aufgrund der bisherigen Fokussierung der Forschung im Bereich Betonermüdung auf die Ermittlung von Bruchlastwechselzahlen fehlt für die substantielle Weiterentwicklung des Nachweises notwendiges Wissen zu den Mechanismen der Betonermüdung.

Das Ziel dieser Arbeit war es daher, grundlegende Erkenntnisse zum Ermüdungsverhalten hochfester Betone bei unterschiedlichen zyklischen Beanspruchungen zu ermitteln und so zu einem besseren Verständnis der Mechanismen der Betonermüdung beizutragen. Hierzu wurde zunächst das Ermüdungsverhalten eines hochfesten Betons anhand der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen systematisch untersucht. Betrachtet wurden drei Belastungsparameter zyklischer Beanspruchungen, die material- und prüfbedingt und damit in der experimentellen Praxis nicht vermeidbar sind: Die bezogene Oberspannung, die Belastungsfrequenz und die Wellenform. Die Bruchlastwechselzahlen wurden im Rahmen der Untersuchungen ebenfalls erfasst und im Hinblick auf die genannten Einflüsse sowie im Kontext mit der Literatur und ausgewählten Regelwerken ausgewertet.

Weitergehend sollten die in der Literatur dokumentierten Ansätze zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens in Anlehnung an die Spannungs-Dehnungslinie bei monoton steigender Beanspruchung bzw. in Anlehnung an die Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung anhand aufeinander abgestimmter Versuche überprüft werden. Zusätzlich war die Beurteilung der in der Literatur zu findenden Hypothesen zu den Hintergründen des Ermüdungsverhaltens von Betonen ein Bestandteil dieser Arbeit.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollten in eine Modellvorstellung zur Beschreibung baustofflicher Phänomene bei Ermüdungsbeanspruchung übertragen und damit eine Verallgemeinerbarkeit der Erkenntnisse erreicht werden.

Im Rahmen eines umfangreichen Untersuchungsprogramms wurden über 270 Versuche bei monoton steigender Beanspruchung, Ermüdungsbeanspruchung sowie Dauerstandsbeanspruchung durchgeführt, die hinsichtlich der Beanspruchungshöhe, der Belastungsgeschwindigkeit und der Regelungsart aufeinander abgestimmt waren.

Es wurden Ermüdungsversuche mit hohen Beanspruchungsniveaus im Bereich von $S_O = 0,95 - 0,60$, mit Belastungsfrequenzen im Bereich von $f_p = 0,1 \text{ Hz} - 10,0 \text{ Hz}$ sowie mit sinusförmiger und dreiecksförmiger Beanspruchung bei Kraftregelung durchgeführt. Die Versuche mit monoton steigender Beanspruchung wurden bei Belastungsgeschwindigkeiten bis $\dot{k} = 4453 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ durchgeführt. Mithilfe dieser Untersuchungen wurde die Druckfestigkeitssteigerung des hochfesten Betons infolge erhöhter Belastungsgeschwindigkeiten sowie der Einfluss erhöhter Belastungsgeschwindigkeiten auf die Spannungs-Dehnungslinien untersucht. Die Dauerstandsversuche wurden für zwei Beanspruchungsniveaus $S_D = 0,90$ und $S_D = 0,80$ durchgeführt. Dabei wurde die Belastung ebenfalls mit erhöhten Belastungsgeschwindigkeiten aufgebracht. Sowohl die Ergebnisse der Versuche mit monoton steigender Beanspruchung als auch die der Dauerstandsversuche dienten als Basis für die beanspruchungsart-übergreifenden Auswertungen.

Anhand der Bruchlastwechselzahlen konnte zunächst gezeigt werden, dass sich der untersuchte hochfeste Beton plausibel in den Kontext früherer Untersuchungen an Betonen unterschiedlicher Festigkeiten einordnen lässt. Diese Einordnung lässt dabei nicht den Schluss zu, dass die Bruchlastwechselzahlen mit steigender Festigkeit des Betons zwangsläufig abnehmen müssen. Die für den hochfesten Beton ermittelten Bruchlastwechselzahlen werden sowohl von Model Code 2010 als auch von Eurocode 2 auf der sicheren Seite liegend beschrieben.

Der Fokus dieser Arbeit lag jedoch auf den Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen infolge Ermüdungsbeanspruchung. Es konnte gezeigt werden, dass die Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen durch die untersuchten Belastungsparameter beeinflusst werden. Damit wurden Ergebnisse früherer Untersuchungen aus der Literatur widerlegt. Charakteristische Zusammenhänge zwischen der Beeinflussung einzelner Kenngrößen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen und der Beeinflussung der Bruchlastwechselzahlen wurden aufgezeigt und beschrieben. Gleichzeitig wurden auch typische Unterschiede der Auswirkungen der Belastungsparameter auf einzelne Kenngrößen festgestellt, die sich in der unterschiedlichen Beeinflussung der Bruchlastwechselzahlen widerspiegeln.

Anhand der Kenngrößen der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen konnten zeitliche Effekte aus der Wirkungsdauer von Beanspruchungen unterschiedlicher Höhe, zyklische Effekte aufgrund der Be- und Entlastungsvorgänge und Einflüsse aus der Belastungsgeschwindigkeit festgestellt werden. Anhand von z. B. unterschiedlichen Dehnungen und Steifigkeiten bzw. Steifigkeitsverlusten an den Phasenübergängen konnten weiterhin Hinweise auf beanspruchungsabhängige Gefügestände abgeleitet werden.

Die vergleichende Auswertung der Spannungs-Dehnungslinien infolge monoton steigender Beanspruchung und der Dehnungsentwicklungen infolge zyklischer Beanspruchung zeigte, dass zwischen den Dehnungen an den Phasenübergängen der zyklischen Dehnungsentwicklung und dem Verlauf der Spannungs-Dehnungslinien infolge monoton steigender Beanspruchung keine verallgemeinerbaren Zusammenhänge zu erkennen sind. Entgegen der Erwartungen wurden in den Ermüdungsversuchen kleinere Bruchdehnungen als in den Vergleichsversuchen mit monoton steigender Beanspruchung bei gleichen Belastungsgeschwindigkeiten ermittelt.

Der Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung und bei hoher Dauerstandbeanspruchung zeigte, dass auch hier allgemein gültige Zusammenhänge schwer ableitbar sind. Die Beanspruchungshöhe und die Belastungsfrequenz können nicht so aufeinander abgestimmt werden, dass sich vergleichbare Dehnungsentwicklungen ergeben. Die Dehnungsentwicklungen bei Dauerstandbeanspruchung sind stärker von der Beanspruchungshöhe abhängig als die Dehnungsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung. Bei zyklischer Beanspruchung wirken sich zeitliche Effekte weniger stark aus als bei Dauerstandbeanspruchung. Das Materialverhalten unter Ermüdungsbeanspruchung wird deutlich von den Be- und Entlastungsvorgängen beeinflusst. Die unterschiedlichen Dehnungen an den Phasenübergängen lieferten Hinweise auf belastungsartabhängige Gefügestände. Gleichzeitig zeigte sich anhand der Dauerstandversuche, dass höhere Belastungsgeschwindigkeiten zu einem erhöhten Dehnungszuwachs in der Frühphase der konstanten Beanspruchungen führen. Übertragen auf Ermüdungsbeanspruchungen bedeutet dies, dass bei vorheriger höherer Belastungsgeschwindigkeit größere viskose Dehnungsanteile im Lastwechsel entstehen könnten.

Insgesamt wurden aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen sechs Hypothesen beurteilt. Es konnte die Hypothese bestätigt werden, dass das Ermüdungsverhalten von Betonen sowohl von einem zeitlichen als auch von einem zyklischen Effekt beeinflusst wird. Die Hypothese, dass die Dehnungen im Lastwechsel von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig seien, wurde anhand der Versuche mit monotoner Laststeigerung bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten sowie für die Ermüdungsversuche anhand der vergleichenden Betrachtung von Steifigkeiten und Steifigkeitsverlusten an den Phasenübergängen bestätigt.

Dagegen wurden zwei Hypothesen, die den Frequenzeinfluss allein auf die unterschiedliche Wirkungsdauer bei hohen Beanspruchungen bzw. den Einfluss der Wellenform allein auf die Belastungsgeschwindigkeit zurückführen, als zu eng gefasst beurteilt. Die Hypothese, dass der Frequenzeinfluss allein auf erhöhte Druckfestigkeiten infolge erhöhter Belastungsgeschwindigkeiten zurückzuführen sei, wird angezweifelt. Diese Beurteilung basiert darauf, dass offensichtlich auch andere Effekte das Ermüdungsverhalten beeinflussen, wie die durchgeführten Untersuchungen zu den drei Beanspruchungsarten zeigen. Grundlegende Überlegungen zum Frequenzeinfluss zeigen zudem, dass noch offene Fragen bestehen z. B. im Hin-

blick auf geringere Druckfestigkeitssteigerungen infolge erhöhter Belastungsgeschwindigkeiten bei hochfesten Betonen.

Die „Schädigungshypothese“ nach [Pfanner – 2003] konnte anhand des Vergleichs der Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung und infolge zyklischer Beanspruchung nicht bestätigt werden. Zusätzlich wurden in der Literatur sowie anhand der eigenen Auswertungen Hinweise darauf gefunden, dass die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten bzw. unterschiedlichen zyklischen Beanspruchungen unterschiedlich sein könnte. Insofern stellt sich bezüglich der „Schädigungshypothese“ die grundlegende Frage, ob und wann sich bei unterschiedlichen Beanspruchungen gleiche Schädigungszustände einstellen.

Die Untersuchungsergebnisse wurden in eine Modellvorstellung übertragen. Hierzu wurden zwei in der Literatur dokumentierte Modellansätze zur Beschreibung der Dehnungsanteile der Ermüdungsdehnung kombiniert betrachtet. Die Modellvorstellung wurde entsprechend der in kontinuierlichen Ermüdungsversuchen erfassbaren Dehnungsanteile angepasst und hinsichtlich der Entstehung zeitabhängiger Dehnungen im Lastwechsel erweitert. Im Rahmen der Modellvorstellung werden zwei Modellebenen betrachtet, sodass einerseits die in Ermüdungsversuchen erfassbaren Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen und andererseits die baustofflich bedingte beanspruchungs-, zeit- und geschwindigkeitsabhängige Entstehung von Dehnungen beschrieben werden kann. Anhand des Einflusses der bezogenen Oberspannung und der Belastungsfrequenz wurde gezeigt, dass diese Modellvorstellung eine gute Basis darstellt, um die baustofflichen Phänomene bei unterschiedlichen zyklischen Beanspruchungen und Beanspruchungsarten zu beurteilen.

Basierend auf den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen und Auswertungen wurde die Hypothese aufgestellt, dass sich im Beanspruchungsprozess infolge unterschiedlicher Beanspruchungen unterschiedlich ausgeprägte Kleinst-Gefügeveränderungen einstellen, die als Randbedingung für die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen wirken. Aufgrund der beanspruchungsabhängigen Ausprägung dieser Kleinst-Gefügeveränderungen stellen sich die Phasenübergänge bei unterschiedlichen Dehnungen und Steifigkeiten ein.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Ansätze zur Beschreibung des Dehnungsverhaltens bei Ermüdungsbeanspruchung anhand des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender Beanspruchung bzw. Dauerstandbeanspruchung insofern zu grobe Herangehensweisen darstellen, als dass sie die Mechanismen der Betonermüdung und die Unterschiede der Gefügestände nicht zufriedenstellend berücksichtigen und beschreiben können. Das Betonverhalten ist beanspruchungs-, zeit- und geschwindigkeitsabhängig und daher insbesondere bei Ermüdungsbeanspruchung wesentlich komplexer als durch solche Ansätze abbildbar.

Die systematische Untersuchung des Dehnungs- und Steifigkeitsverhaltens von Betonen, als ein erster Schritt in Richtung einer stärker mechanismenorientierten Betrachtung der Betonermüdung, führte zu neuen und tiefergehenden Erkenntnissen. Die Forschung im Bereich

der Betonermüdung sollte diesen Weg zukünftig weitergehen und durch ergänzende Untersuchungen auf Gefügebene ausbauen.

11.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Ermüdungsverhalten eines hochfesten Betons anhand der Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen grundlegend untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass das gewählte Vorgehen in einem ersten Schritt praktikabel und zielführend ist, um die Mechanismen der Betonermüdung besser zu verstehen und beschreiben zu können. Anhand der bei kontinuierlichen Ermüdungsbeanspruchungen ermittelbaren Dehnungsentwicklungen kann jedoch nur eine Quantifizierung in elastische und bleibende Dehnung vorgenommen werden. Eine detailliertere Unterscheidung der bleibenden Dehnung in plastische und irreversible visko-elastische Dehnungsanteile ist kaum möglich. Hierzu besteht weiterer Forschungsbedarf.

Spezielle Ermüdungsversuche mit Haltephasen zu definierten Zeitpunkten können der Untersuchung der Akkumulation plastischer und visko-elastischer Dehnungsanteile dienen. Gleichzeitig sollte auch die Entstehung dieser beanspruchungs-, zeit- und geschwindigkeitsabhängigen Dehnungsanteile in den Lastwechseln untersucht werden. Hierbei müssen deutlich kürzere Belastungs- und Entlastungszeiträume, höhere Beanspruchungen sowie höhere Be- und Entlastungsgeschwindigkeiten betrachtet werden, als dies bisher im Forschungsbereich der zeitabhängigen Verformungen getan wurde. Das Rückkriechen und die Einflüsse auf das Rückkriechen müssen hierbei ebenfalls berücksichtigt werden.

Der elastische Dehnungsanteil der Ermüdungsdehnung stellt sich aufgrund der degradierten Steifigkeit und damit aufgrund des Gefügestands des Betons ein. Die im Versuch sichtbare Steifigkeit ist jedoch abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit, der Beanspruchung und der Last-Zeit-Funktion und damit zwischen verschiedenen zyklischen Beanspruchungsarten nicht unbedingt direkt vergleichbar. Eine konkrete Beschreibung des strukturellen Gefügestands ist basierend auf der Gesamtdehnung eines kontinuierlichen Ermüdungsprozesses kaum möglich.

Insofern sollten verstärkt gefügeorientierte Untersuchungsmethoden kombiniert angewendet werden, um die Auswirkungen verschiedener zyklischer Beanspruchungen, verschiedener Beanspruchungsarten und ihrer Kombinationen auf den Gefügestand von Betonen zu untersuchen und beschreiben zu können. Hierzu können Untersuchungsmethoden, wie z. B. Rasterelektronenmikroskopie, Computertomographie, Schallemissionsmessungen, angewandt werden.

Viele gefügeorientierte Untersuchungsmethoden liefern jedoch nur Momentaufnahmen des Gefüges, sodass diese nur zu ausgewählten „Zeitpunkten“ des Ermüdungsprozesses in be-

grenzter Anzahl eingesetzt werden können. Trotzdem sind bei einer kombinierten Auswertung zusammen mit den Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen neue Erkenntnisse zur Materialdegradation auf kleinen Skalenebenen zu erwarten. Auf diese Weise kann zu einem tiefergehenden Verständnis des Betonverhaltens, nicht nur bei Ermüdungsbeanspruchung, beitragen werden.

In der Realität treten verschiedene Beanspruchungsarten kombiniert auf und beeinflussen den aktuellen Gefügestand von Betonen gemeinsam. Im Rahmen von gefügeorientierten Untersuchungen sollten daher auch Kombinationen verschiedener Beanspruchungsarten sowie Reihenfolgeeffekte aufgrund verschiedener zyklischer Beanspruchungen betrachtet werden, da von einer gegenseitigen Beeinflussung ausgegangen werden muss. Fernziel dieser Untersuchungen sollte z. B. ein besser geeigneter Ansatz zur Beschreibung der Schadenakkumulation bei Ermüdungsbeanspruchung sein.

Die vorgestellte und erweiterte Modellvorstellung kann ebenfalls Ausgangspunkt bei der vergleichenden Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von normalfesten Betonen sein. Die Dehnungsentwicklungen normalfester Betone weisen ebenfalls die berücksichtigten Dehnungsanteile auf, sodass die Modellvorstellung auch auf normalfeste Betone angewendet werden kann. Gleichzeitig unterscheidet sich die Relation der verschiedenen Dehnungsanteile bei normalfesten Betonen und hochfesten Betonen. Unter Verwendung der Modellvorstellung sollten die Dehnungsentwicklungen normalfester Betone und hochfester Betone daher vergleichend betrachtet werden, um hieraus Rückschlüsse auf den Einfluss der Betonfestigkeit auf das Ermüdungsverhalten ziehen zu können.

Die mechanismenorientierte Erforschung der Betonermüdung bei gleichzeitiger Betrachtung von Gefügeständen erfordert umfangreiche und aufwendige Untersuchungen, bei denen verschiedene Teilaspekte (z. B. Betonfestigkeit, Reihenfolgeeffekte, Beanspruchungs-, Zeit- und Belastungsgeschwindigkeitseinflüsse) im Fokus stehen können. Es ist unmöglich diese verschiedenen Teilaspekte in vereinzelt eigenständigen Forschungsprojekten in einer angemessenen Zeit zielorientiert und effektiv zu untersuchen. Aufgrund der Fokussierung auf Mechanismen sind gleichzeitig Synergien bei der Untersuchung der verschiedenen Teilaspekte zu erwarten. Durch die Verknüpfung und Übertragung von gewonnenen Erkenntnissen zu einzelnen Teilaspekten können wiederum zusätzliche Erkenntnisse gewonnen und damit effektiv zu einem besseren Verständnis des Materialverhaltens von Betonen auf unterschiedlichen Skalenebenen beigetragen werden. Für die effektive mechanismenorientierte Untersuchung der Betonermüdung ist daher ein koordinierter Forschungsverbund der am besten geeignete Rahmen.

Literatur

Verwendete Literatur

- [Alda – 1978] Alda, W.: Zum Schwingkriechen von Beton. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1978
- [Anders – 2013] Anders, I.: Stoffgesetz zur Beschreibung des Kriech- und Relaxationsverhaltens junger normal- und hochfester Betone. Dissertation, Karlsruher Reihe Massivbau Baustofftechnologie Materialprüfung, Heft 73, Karlsruhe, 2013
- [Anders / Lohaus – 2007] Anders, S. ; Lohaus, L.: Polymer- und fasermodifizierte Hochleistungsbetone für hochdynamisch beanspruchte Verbindungen wie „Grouted Joints“ bei Windenergieanlagen. Abschlussbericht zum Forschungsstipendium T 4/2002, Stiftung Industrieforschung Köln, Hannover, 2007
- [Aulia – 2005] Aulia, T. B.: Ein Beitrag zur Bruchmechanik von unbewehrtem hochfesten Beton. Dissertation, Schriftenreihen des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Band 10, Leipzig, 2005
- [Awad / Hilsdorf – 1971] Awad, M. E. ; Hilsdorf, H. K.: Strength and deformation characteristics of plain concrete subjected to high repeated and sustained loads. Civil Engineering Studies, SRS No. 372, University of Illinois, Urbana, Illinois, February 1971
- [Awad / Hilsdorf – 1972] Awad, M. E. ; Hilsdorf, H. K.: Strength and deformation characteristics of plain concrete subjected to high repeated and sustained loads. Fatigue of concrete Proceedings of ACI Abeles Symposium, Hollywood, SP41-1, 1972, pp. 1 – 13
- [Balázs – 1994] Balázs, G. L.: Deformation based fatigue failure criterion. In: Aliabadi, M. H. ; Carpinteri, A. ; Kaliszky, S. ; Cartwright, D. J. (Hrsg.): Localized damage III – Computer-aided assessment and control, Computational Mechanics Publications, Southampton, 1994, pp. 631 – 638
- [Bischoff / Perry – 1991] Bischoff, P. H. ; Perry, S. H.: Compressive behaviour of concrete at high strain rates. Materials and Structures, No. 24, 1991, pp. 425 – 450
- [Bischoff / Perry – 1986] Bischoff, P. H. ; Perry, S. H.: Compressive strain rate effects of concrete. Mindess, S. ; Shah, S. P. (Editors): Cement-Based Composites: Strain Rate Effects on Fracture. Materials Research Society, Pittsburgh, 1986, pp. 151 – 165
- [Breitenbücher et al. – 2007] Breitenbücher, R. ; Ibuk, H. ; Osterminski, K.: Veränderung der Steifigkeit und des Dehnungsverhaltens von Normalbeton bei zyklischer Druckschwellbeanspruchung mit Ruhephasen. Beton- und Stahlbetonbau, Nr. 102, Heft 2, 2007, S. 80 – 87
- [Bresler / Bertero – 1975] Bresler, B. ; Bertero, V. V.: Influence of High Strain Rate and Cyclic Loading on Behavior of Unconfined and Confined Concrete in Compression. Proceedings of Second Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ontario, 1975, pp. 1 – 13

-
- [Carrasquillo et al. – 1981] Carrasquillo, R. L. ; Nilson, A. H.; Slate, F. O.: Properties of High Strength Concrete Subjected to Short-Term Loads. ACI Journal, Vol. 78, May-June, 1981, pp. 171 – 178
- [Carrasquillo et al. – 1981a] Carrasquillo, R. L. ; Slate, F. O. ; Nilson, A. H.: Microcracking and Behaviour of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loading. ACI Journal, Vol. 78, May-June, 1981, pp. 179 – 186
- [Chen – 1982] Chen, W. F.: Plasticity in reinforced concrete. McGraw-Hill Book Company, New York, 1982
- [CEB – 1988] CEB – Comité international du Béton (Hrsg.): Fatigue of concrete structures, State of the Art Report. CEB-Bulletin d'Information, No. 188, Lausanne, 1988
- [CEB / FIP – 1993] CEB – Comité Euro-international du Béton (Hrsg.): “CEB-FIP Model Code 90”. Bulletin d'Information, No. 213/214, Thomas Telford Ltd., London, 1993
- [Cornelissen – 1984] Cornelissen, H. A. W.: Fatigue failure of concrete in tension. Heron, Vol. 29, No. 4, 1984
- [Cornelissen / Reinhardt – 1984] Cornelissen, H. A. W. ; Reinhardt, H. W.: Uniaxial tensile fatigue failure of concrete under constant-amplitude and programme loading. Magazine of Concrete Research, Vol. 36, No. 129, December 1984, pp. 216 – 226
- [Cotsovos / Pavlović – 2008] Cotsovos, D. M. ; Pavlović, M. N.: Numerical investigation of concrete subjected to compressive impact loading. Part 1: A fundamental explanation for the apparent strength gain at high loading rates. Computers & Structures, 86, 2008, pp. 145 – 163
- [Dahl et al. – 1993] Dahl, P. A. ; Fluge, F. ; Hansen, E. A.: Influence of specimen geometry and loading rate on the compressive strength of high strength concrete. Proceedings of the third International Symposium on Utilization of High-Strength Concrete, Vol. 2, Lillehammer, Norway, 1993, pp. 1038 – 1045
- [Diaz / Hilsdorf – 1971] Diaz, S. I. ; Hilsdorf, H. K.: Fracture mechanics of concrete under static, sustained, and repeated compressive loads. Civil Engineering Studies, SRS No. 382, University of Illinois, Urbana, Illinois, August 1971
- [DIN 50100 – 1978] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Werkstoffprüfung; Dauerschwingversuch, Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung. Beuth Verlag, Berlin, 1978
- [DIN EN 206-1 – 2001] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Beton, Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000. Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [DIN EN 1992-1-1 – 2011] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Eurocode 2 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010. Beuth Verlag, Berlin, 2011
-

- [DIN EN 1992-1-1/NA – 2013] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Nationaler Anhang – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Beuth Verlag, Berlin, 2013
- [DIN EN 1992-2 – 2010] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Eurocode 2 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln. Deutsche Fassung EN 1992-2:2005 + AC:2008. Beuth Verlag, Berlin, 2010
- [DIN EN 1992-2/NA – 2013] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Nationaler Anhang – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln. Beuth, Berlin, 2013
- [DIN EN 12350 – 2009] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Prüfung von Frischbeton, Teile 1-12. Beuth Verlag, Berlin, Berlin, 2009
- [DIN EN 12390-3 – 2009] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Deutsche Fassung EN 12390-3:2009, Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [DIN EN ISO 7500-1 – 1999] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Prüfung von Prüfmaschinen für statische einachsige Beanspruchungen – Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen, Prüfung und Kalibrierung der Kraftmeßeinrichtung, Beuth Verlag, Berlin, 1999
- [DIN ISO 5725-1 – 1997] Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen – Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe. Kombinierte Deutsch-Englische Fassung, Beuth Verlag, Berlin, 1997
- [Do et al. – 1993] Do, M.-T. ; Chaallal, O. ; Aïtcin, P.-C.: Fatigue behavior of high-performance concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 5, No. 1, 1993, pp. 96 – 111
- [fib – 2013] fib – Fédération internationale du béton (Hrsg.): fib Model Code for concrete structures 2010, Ernst & Sohn, Berlin, 2013
- [fib – 2013a] fib – Fédération internationale du béton (Hrsg.): State-of-the-art report, *fib Bulletin 70: Code-type models for concrete behaviour – Background of MC 2010*, Lausanne, 2013
- [fib – 2008] fib – Fédération internationale du béton (Hrsg.): Constitutive modeling of high strength / high performance concrete, Bulletin 42, Lausanne, 2008
- [FIP / CEB – 1990] FIP– Fédération Internationale de la Précontrainte (Hrsg.): High Strength Concrete: State of the Art Report. CEB-Bulletin d'Information, No. 197, London, 1990
- [Gaede – 1962] Gaede, K.: Versuche über die Festigkeit und die Verformung von Beton bei Druck-Schwellbeanspruchung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 144, Ernst & Sohn, Berlin, 1962

-
- [Gettu et al. – 1993] Gettu, R. ; Aguado, A.; Oliverira, M. O. F. ; Carol, I.: Damage in high-strength concrete due to monotonic and cyclic compression. Symposium on Utilization of high strength concrete. Proceedings Vol. 2, Lillehammer, 1993, pp. 1070 – 1075
- [Glücklich – 1968] Glücklich, J.: The effect of microcracking on time-dependent deformations and the long-term strength of concrete. The Structure of Concrete and its behaviour under load. Proceedings of an International Conference, London, 1968, pp. 176 – 189
- [Graf et al. – 1998] Graf, U ; Hennig, H.-J. ; Stange, K. ; Wilrich, P.-T.: Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik. 3., völlig neu bearb. Aufl., zweiter korrigierter Nachdruck, Springer-Verlag, Berlin, 1998
- [Grübl et al. - 2001] Grübl, P. ; Weigler, H. ; Karl, S.: Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften. 2. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 2001
- [Grünberg / Oneschkow – 2011] Grünberg, J. ; Oneschkow, N.: Gründung von Offshore-Windenergieanlagen aus filigranen Betonkonstruktionen unter besonderer Beachtung des Ermüdungsverhaltens von hochfestem Beton. Abschlussbericht zum BMU-Verbundforschungsprojekt. Leibniz Universität Hannover, 2011
- [Han – 1996] Han, N.: Time Dependent Behaviour of High Strength Concrete. Dissertation, Delft University of Technology, 1996
- [Held – 1992] Held, M.: Ein Beitrag zur Herstellung und Bemessung von Druckgliedern aus hochfestem Beton (B60 – B125). Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1992
- [Hohberg – 2004] Hohberg, R.: Zum Ermüdungsverhalten von Beton. Dissertation, Berlin, 2004
- [Holmen – 1979] Holmen, J. O.: Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading. The Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, 1979
- [Hsu – 1981] Hsu, T. T. C.: Fatigue of Plain Concrete. ACI Journal, Juli-August 1981, pp. 292 – 305
- [Ibuk – 2010] Ibuk, H.: Ermüdungsverhalten von Beton unter Druckschwellbeanspruchung. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2010-3, Ruhr-Universität Bochum, Shaker Verlag, 2010
- [Iravani / MacGregor – 1998] Iravani, S. ; MacGregor, J. G.: Sustained Load Strength and Short-Term Strain Behavior of High-Strength Concrete. ACI Materials Journal, Vol. 95, No. 5, September-October, 1998, pp. 636 – 647
- [Karsan / Jirsa – 1969] Karsan, D. I. ; Jirsa, J. O.: Behavior of concrete under compressive loadings. Journal of the structural division (ASCE), Vol. 95, 1969, pp. 2453 – 2563
- [Kim / Kim – 1996] Kim, J.-K. ; Kim, Y.-Y.: Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 10, 1996, pp. 1513 – 1523
- [Klausen – 1978] Klausen, D.: Festigkeit und Schädigung von Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung. Dissertation, Darmstadt, 1978
-

- [König et al. – 2001] König, G. ; Tue, N.V. ; Zink, M.: Hochleistungsbeton. Bemessung, Herstellung und Anwendung. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2001
- [König / Tue – 2006] König, G. ; Tue, N. V.: Abschlussbericht DFG-Forschungsvorhaben KO362/61-1, Festigkeit von Hochleistungsbeton bei häufig wiederholter Beanspruchung (Ermüdung). Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Leipzig, 2006
- [Kono et al. – 2008] Kono, S. ; Hasegawa, H. ; Mori, K. ; Ichioka, Y. ; Sakashita, M. ; Watanabe, F.: Low cycle fatigue characteristics of high strength concrete. Proceedings of the 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokio, 2008, pp. 616 – 622
- [Lohaus et al. – 2012] Lohaus, L. ; Oneschkow, N. ; Wefer, M.: Design model for the fatigue behaviour of normal-strength, high strength and ultra-high strength concrete. Structural Concrete, Vol. 13, No. 3, 2012, pp. 182 – 192
- [Lohaus et al. – 2007] Lohaus, L. ; Anders, S. ; Wefer, M.: High-Cycle Fatigue of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) - Fatigue Strength and Damage Development. 3rd Int. Conference on Lifetime Oriented Design Concepts, Bochum, 2007, pp. 257 – 265
- [Lohaus / Steinborn – 2011] Lohaus, L. ; Steinborn, T. (Hrsg.): Fortschritte in der Baustofftechnik, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 9, Leibniz Universität Hannover, 2011
- [Marx et al. – 2014] Marx, S. ; Grünberg, J. ; Hansen, M. ; Schneider, S.: Sachstandsbericht zum Forschungsvorhaben V474, „Über den Stand der Forschung zu Grenzzuständen der Ermüdung von dynamisch hoch beanspruchten Tragwerken aus Beton“, Institut für Massivbau, Hannover, 2014 (wird demnächst veröffentlicht)
- [Mehmel / Kern – 1962] Mehmel, A. ; Kern, E.: Elastische und plastische Stauchungen von Beton infolge Druckschwell- und Standbelastung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 153, Ernst & Sohn, Berlin, 1962
- [Medeiros – 2012] Medeiros, A.: Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras. Dissertation, Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro, 2012
- [Medeiros et al. – 2013] Medeiros, A. ; Zhang, X. X. ; Ruiz, G.: Frequency effect on the compressive fatigue behaviour of plain and fiber-reinforced concretes. VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-8, 2013, pp. 815 – 823
- [Neville – 2011] Neville, A. M.: Properties of concrete. 5. ed., Pearson/Prentice-Hall, Harlow, 2011
- [Ngab et al. – 1981] Ngab, A. S. ; Nilson, A. H. ; Slate, F. O.: Shrinkage and Creep of High Strength Concrete. ACI Journal, Vol. 78, July-August, 1981, pp. 255 – 261
- [Ngab et al. – 1981a] Ngab, A. S. ; Slate, F. O. ; Nilson, A. H.: Microcracking and Time-Dependent Strains in High Strength Concrete. ACI Journal, Vol. 78, July-August, 1981, pp. 262 – 268
- [Petković – 1991] Petković, G.: Properties of concrete related to fatigue damage with emphasis on high strength concrete. Dissertation, The University of Trondheim, Norway, 1991

-
- [Petković et al. – 1990] Petković, G. ; Lenschow, R. ; Stemland, H. ; Rosseland, S.: Fatigue of High-Strength Concrete. High-strength concrete: Second International Symposium, American Concrete Institute (ACI Special Publication 121), Detroit, 1990, pp. 505 – 525
- [Petković et al. – 1992] Petković, G. ; Stemland, H. ; Rosseland, S.: High strength concrete SP 3 - Fatigue, Report 3.2: Fatigue of High Strength Concrete. SINTEF Structural Engineering - FCB, Trondheim, August 1992
- [Pfanner – 2003] Pfanner, D.: Zur Degradation von Stahlbetonbauteilen unter Ermüdungsbeanspruchung. Forschungs-Bericht, VDI Reihe 4 Nr. 189, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003
- [Pfister – 2007] Pfister, T. R.: Ein Ermüdungsmodell für Zuverlässigkeitsanalysen von Stahlbetontragwerken. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2007
- [Rasch – 1962] Rasch, C.: Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons und Spannungsverteilung in der Biegedruckzone bei konstanter Dehngeschwindigkeit. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 154, Berlin, Ernst & Sohn, 1962
- [Reinhardt – 1987] Reinhardt, H. W.: Simple relations for the strain rate influence on concrete. Annual journal of concrete and concrete structures, Institut für Massivbau, T. H. Darmstadt, 1987, pp. 202 – 211
- [Reinhardt et al. – 1978] Reinhardt, H. W. ; Stroeven, P. ; Uijl, J. A. ; Kooistra, T. R.; Vrencken, J. H. A. M.: Einfluß von Schwingbreite, Belastungshöhe und Frequenz auf die Schwingfestigkeit von Beton bei niedrigen Bruchlastspielzahlen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, Nr. 9, 1978, pp. 498 – 503
- [Rüsch – 1972] Rüsch, H.: Stahlbeton – Spannbeton, Band 1: Werkstoffeigenschaften und Bemessungsverfahren. Werner-Verlag, Düsseldorf, 1972
- [Rüsch et al. – 1968] Rüsch, H. ; Sell, R. ; Rasch, C. ; Grasser, E. ; Hummel, A. ; Wesche, K. ; Flatten, H.: Festigkeit und Verformung von unbewehrtem Beton unter konstanter Dauerlast. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 198, Ernst & Sohn, Berlin, 1968
- [Sachs – 1978] Sachs, L.: Angewandte Statistik: Statistische Methoden und ihre Anwendungen. 5. neubearb. und erweiterte Aufl., Springer, Berlin, 1978
- [Schickert – 1980] Schickert, G.: Schwellenwerte beim Betondruckversuch. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 312, Ernst & Sohn, Berlin, 1980
- [Schneider et al. – 2012] Schneider, S. ; Vöcker, D. ; Marx, S.: Zum Einfluss der Belastungsfrequenz und der Spannungsgeschwindigkeit auf die Ermüdungsfestigkeit von Beton. Beton- und Stahlbetonbau, 107, Heft 12, 2012, S. 836 – 845
- [Schwabach – 2005] Schwabach, E.: Verformungs- und Degradationsverhalten von niederzyklisch uniaxial druckbeanspruchtem Beton. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2005
- [Shah / Chandra – 1970] Shah, S. P. ; Chandra, S.: Fracture of Concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading. ACI Journal, Vol. 67, No. 10, 1970, pp. 816 – 825
-

- [Shen – 1992] Shen, J.-H.: Lineare und nichtlineare Theorie des Kriechens und der Relaxation von Beton unter Druckbeanspruchung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 432, Ernst & Sohn, Berlin, 1992
- [Siebel – 1989] Siebel, E.: Verformungsverhalten, Energieaufnahme und Tragfähigkeit von Normal- und Leichtbeton im Kurzzeitversuch. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 50, 1989
- [Sinha et al. – 1964] Sinha, B. P. ; Gerstle, K. H. ; Tulin, L. G.: Stress-strain relation for concrete under cyclic loading. Journal of the American Concrete Institute, February, 1964, pp. 195 – 211
- [Smadi et al. – 1985] Smadi, M. M. ; Slate, F. O. ; Nilson, A.: High-, Medium-, and Low-Strength Concretes Subjected to Sustained Overloads – Strains, Strengths, and Failure. ACI Journal, Vol. 82, September-October, 1985, pp. 657 – 664
- [Sparks – 1982] Sparks, P. R.: The Influence of Rate of Loading and Material Variability on the Fatigue Characteristics of Concrete. American Concrete Institute Special Publication SP 75-16, 1982, pp. 331 – 342
- [Sparks / Menzies – 1973] Sparks, P. R. ; Menzies, J. B.: The effect of rate of loading upon the static and fatigue strengths of plain concrete in compression. Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 83, 1973, pp. 73 – 80
- [Streit – 1991] Streit, W.: Zeitabhängige Verformungen von Beton infolge hoher Druckbeanspruchungen. Dissertation, Technische Universität München, 1991
- [Suter / Mickleborough – 1975] Suter, G. T. ; Mickleborough, N. C.: Creep of concrete under cyclically varying dynamic loads. Cement and Concrete Research, Vol. 5, 1975, pp. 565 – 575
- [Tepfers et al. – 1973] Tepfers, R. ; Görlin, J. ; Samuelsson, T.: Concrete subjected to pulsating load and pulsating deformation of different pulse waveforms. Nordisk betong, No. 4, 1973
- [Tepfers / Kutti – 1979] Tepfers, R. ; Kutti, T.: Fatigue Strength of Plain, Ordinary, and Lightweight Concrete. ACI Journal, Vol. 76, No. 5, 1979, pp. 635 – 654
- [Thiele et al. – 2011] Thiele, M. ; Baeßler, M. ; Rogge, A. ; Pirskawetz, S.: Schädigungsevolution in Beton unter hochzyklischer Ermüdungsbeanspruchung. 52. DAfStb-Forschungskolloquium, Berlin, 2011
- [Tomaszewicz – 1992] Tomaszewicz, A.: High strength concrete SP1 – Beams and columns, Report 1.4: High-Strength Concrete Subjected to Long-Term Sustained Loads. SINTEF Structural Engineering - FCB, Trondheim, August 1992
- [Whaley / Neville – 1973] Whaley, C. P. ; Neville, A. ; M.: Non-elastic deformation of concrete under cyclic compression. Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 84, 1973, pp.145 – 154
- [Wittmann – 1987] Wittmann, F. H.: Structure of concrete and crack formation. In: K. P. Hermann & L. H. Larsson (Hrsg.): Fracture of non-metallic Materials, Dordrecht: Reidel, 1987

-
- [Wilrich / Henning – 1998] Wilrich, P.-Th. ; Henning, H.-J.: Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik. 3., völlig neu bearbeitete Auflage, 2. korr. Nachdruck, Springer-Verlag, Berlin, 1998
- [Wefer – 2010] Wefer, M.: Materialverhalten und Bemessungswerte von ultrahochfestem Beton unter einaxialer Ermüdungsbeanspruchung. Dissertation, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 7, Leibniz Universität Hannover, 2010
- [Weigler / Freitag – 1975] Weigler, H. ; Freitag, W.: Dauerschwell- und Betriebsfestigkeit von Konstruktions-Leichtbeton. Deutsche Ausschuss für Stahlbeton, Heft 247, Ernst & Sohn, Berlin, 1975
- [Weigler / Rings – 1987] Weigler, H. ; Rings, K.-H.: Unbewehrter und bewehrter Beton unter Wechselbeanspruchung. Deutsche Ausschuss für Stahlbeton, Heft 383, Ernst & Sohn, Berlin, 1987
- [Wesche / Krause – 1972] Wesche, K. ; Krause, K.: Der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul von Beton. Materialprüfung, Nr. 7, 1972, pp. 212 – 218
- [Zhang et al. – 1997] Zhang, B. ; Phillips, D. V. ; Wu, K.: Further research on fatigue properties of plain concrete. Magazine of Concrete Research, Vol. 49, No. 180, 1997, pp. 241 – 252
- [Zhang et al. – 2012] Zhang, X. ; Ruiz, G. ; Yu, R. C. ; Poveda, E. ; Porras, R.: Rate effect on the mechanical properties of eight types of high-strength concrete and comparison with FIB MC 2010. Construction and Building Materials, 30, 2012, pp. 301 – 308
- [Zhao et al. – 1996] Zhao, G. – Y. ; Wu, P. – G. ; Bai, L. – M.: Research on fatigue behavior of high-strength concrete under compressive cyclic loading. Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance concrete, Paris, 1996, pp. 757 – 764

Weiterführende Literatur

- [Anders – 2007] Anders, S.: Betontechnische Einflüsse auf das Tragverhalten von Grouted Joints. Dissertation. Berichte aus dem Institut für Baustoffe Heft 6, Leibniz Universität Hannover, 2007
- [Assimacopoulos et al. – 1959] Assimacopoulos, B. M. ; Warner, R. F. ; Ekberg, C. E.: High speed fatigue tests on small specimens of plain concrete. PCI Journal, Vol. 4, No. 2, 1959, pp. 53 – 70
- [Curbach – 1987] Curbach, M.: Festigkeitssteigerung von Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruhe, 1987
- [Danielewicz – 1994] Danielewicz, I.: Zur Ermüdungsbemessung von Beton-Straßenbrücken. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1994

- [Freudenthal / Roll – 1958] Freudenthal, A. M. ; Roll, F.: Creep and Creep Recovery of Concrete under High Compressive Stress. ACI Journal, V. 54, No. 12, June, 1958, pp. 1111 – 1142
- [Miner – 1945] Miner, M. A.: Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, Vol. 12, Nr. 3, 1945, pp. 159 – 164
- [Neville – 1970] Neville, A. M.: Creep of Concrete: Plain, Reinforced, and Prestressed. American Elsevier Publishing Company, New York, 1970
- [Palmgren – 1924] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. Zeitschrift des VDI 68, Nr. 14, 1924, S. 339 – 341, 1924
- [Roll – 1964] Roll, F.: Long-Term Creep-Recovery of Highly Stressed Concrete Cylinders. Symposium on Creep of Concrete, SP-9, American Concrete Institute, Detroit, 1964, pp. 95 – 114
- [Smadi – 1983] Smadi, M. M.: Time-Dependent Behavior of high-strength concrete under high sustained compressive stresses. Ph.D. Thesis, Graduate School of Cornell University, 1983
- [Stroeven – 2010] P. Stroeven: Low-cycle compression fatigue of reinforced concrete structures. Procedia Engineering, Vol. 2, 2010, pp. 309 – 314

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Skalenebenen für Beton [Wittmann – 1987] nach [Schwabach – 2005].....	7
Abbildung 2.2:	Verlauf der Längsdehnung ε_L und der Volumenänderung $\Delta V/V$ für normalfesten Beton, zusammengeführt aus [Glücklich – 1968], [Chen – 1982], [Siebel – 1989], [Schwabach – 2005], [Neville – 2011].....	9
Abbildung 2.3:	Vergleich der Spannungs-Dehnungslinien normalfester und hochfester Betone [FIP / CEB – 1990].....	12
Abbildung 2.4:	Spannungs-Dehnungslinien für verschiedene Betonfestigkeiten nach [DIN EN 1992-1-1 – 2011]	13
Abbildung 2.5:	Dehngeschwindigkeiten für verschiedene Belastungsarten [fib – 2013].....	14
Abbildung 2.6:	Anteile der Betondehnung, in Anlehnung an [Streit – 1991]	14
Abbildung 2.7:	Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Spannungs-Dehnungslinie von Beton [Rüsch – 1972].....	15
Abbildung 2.8:	Spannungs-Dehnungslinien bei verschiedenen Beanspruchungsgeschwindigkeiten [Awad / Hilsdorf – 1971]	16
Abbildung 2.9:	Linearer Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und logarithmierter Beanspruchungsgeschwindigkeit [Bischoff / Perry – 1986]	17
Abbildung 2.10:	Geschwindigkeitsabhängige Druckfestigkeitssteigerung nach [fib – 2013] und [CEB / FIP – 1993].....	19
Abbildung 2.11:	Parameter kraft geregelter Sinusschwingungen, angelehnt an [DIN 50100 – 1978].....	21
Abbildung 2.12:	Wöhlerkurven für verschiedene bezogene Unterspannungen nach [fib – 2013].....	22
Abbildung 2.13:	Bereichseinteilung Ermüdung, nach [Hsu – 1981].....	24
Abbildung 2.14:	Dehnungsentwicklungen bei Ermüdungsbeanspruchung (schematisch).....	25
Abbildung 2.15:	Veränderung der Hysteresen mit steigender Anzahl Lastwechsel [Mehmel / Kern – 1962]	26
Abbildung 2.16:	Schematische Darstellung des im Entlastungsast ermittelten Sekantenmoduls	27
Abbildung 2.17:	Steifigkeitsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung (schematisch).....	27
Abbildung 2.18:	Verlauf von Belastung und Geschwindigkeit bei verschiedenen Wellenformen	29
Abbildung 2.19:	Wöhlerkurven nach [fib – 2013] und [DIN EN 1992-1-1 – 2011], [DIN EN 1992-2 – 2010].....	33
Abbildung 2.20:	Verlauf der prozentualen Steifigkeitsabnahme [Holmen – 1979]	35
Abbildung 2.21:	Bruchlastwechselzahlen nach [Petković et al. – 1992] für einen normalfesten und einen hochfesten Normalbeton für $S_U = 0,05$ und $S_U = 0,40$	38
Abbildung 2.22:	Dehnungsentwicklung für normalfesten und hochfesten Beton [Kim / Kim – 1996].....	39
Abbildung 2.23:	Dehnungs-Zeit-Diagramm für Beton unter hoher Dauerlast [Streit – 1991].....	47
Abbildung 2.24:	Vergleichende Darstellung von Hysteresen und umhüllender Kurve [Sinha et al. – 1964].....	52
Abbildung 2.25:	Hypothese gleicher in Schädigung dissipierter Energien bei zyklischer und monoton steigender Beanspruchung [Pfanner – 2003].....	53
Abbildung 2.26:	Zusammenhang zwischen der Dehnung infolge monoton steigender und zyklischer Beanspruchung [Hohberg – 2004]	55

Abbildung 2.27:	Verbundschlupf zwischen Bewehrung und Beton bei zyklischer und monoton steigender Beanspruchung [Balázs – 1994].....	55
Abbildung 2.28:	Vergleich der Dehnungen nach $0,5 \cdot 10^6$ Lastwechseln bzw. 22 Stunden für Druckschwell- und Dauerstandbeanspruchung [Mehmel / Kern – 1962]	56
Abbildung 2.29:	Vergleich der Dehnung bei Druckschwell- bzw. Dauerstandbeanspruchung [Whaley / Neville – 1973]	57
Abbildung 4.1:	Verwendete PVC-Schalung	67
Abbildung 4.2:	Universalprüfmaschine mit 1 MN-Zylinder [Lohaus / Steinborn – 2011]	69
Abbildung 4.3:	Zusammenhang zwischen Beanspruchungsniveau, Belastungsgeschwindigkeit und Belastungsfrequenz.....	76
Abbildung 4.4:	Versuchsaufbau in der servohydraulischen Universalprüfmaschine	78
Abbildung 5.1:	Mittelwertkurven der Spannungs-Dehnungslinien der Charge B21.....	87
Abbildung 5.2:	Mittelwertkurven der Spannungs-Dehnungslinien der Charge B22.....	87
Abbildung 5.3:	Mittelwertkurven der Spannungs-Dehnungslinien der Charge B23.....	88
Abbildung 5.4:	Druckfestigkeitssteigerung in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit (B19).....	91
Abbildung 5.5:	Druckfestigkeitssteigerung für verschiedene Chargen	91
Abbildung 5.6:	Vergleich der Druckfestigkeiten mit den Funktionen nach Model Code 90 und Model Code 2010	92
Abbildung 6.1:	Auswirkung des Wechsels der Wellenform im Lastwechsel.....	96
Abbildung 6.2:	Auswirkung der Verkleinerung der Oberlast im Lastwechsel.....	97
Abbildung 6.3:	Auswirkung der Erhöhung der Belastungsfrequenz pro Zeiteinheit und im Lastwechsel	98
Abbildung 6.4:	Vergleich der logarithmierten Bruchlastwechselzahlen mit der Literatur (Mittelwerte).....	103
Abbildung 6.5:	Einfluss der Belastungsfrequenz auf die logarithmierten Bruchlastwechselzahlen (Einzel- und Mittelwerte).....	106
Abbildung 6.6:	Regressionsgeraden der Bruchlastwechselzahlen für verschiedene Prüffrequenzen (Einzelwerte).....	107
Abbildung 6.7:	Einfluss der Belastungsfrequenz für verschiedene bezogene Oberspannungen (Mittelwerte).....	107
Abbildung 6.8:	Vergleich mit in der Literatur dokumentierten Bruchlastwechselzahlen, Low-Cycle-Fatigue (Mittelwerte)	108
Abbildung 6.9:	Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Belastungsdauer (Einzel- und Mittelwerte).....	109
Abbildung 6.10:	Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Bruchlastwechselzahlen der Dreiecksversuche.....	110
Abbildung 6.11:	Einfluss der Wellenform auf die Bruchlastwechselzahlen, $f_p = 0,1$ Hz bzw. $f_p = 0,09$ Hz	111
Abbildung 6.12:	Einfluss der Wellenform auf die Bruchlastwechselzahlen, $f_p = 1,0$ Hz bzw. $f_p = 0,89$ Hz	111
Abbildung 6.13:	Bruchlastwechselzahlen im Vergleich mit Model Code 2010, Eurocode 2 und Model Code 90	113
Abbildung 6.14:	Dehnungsentwicklungen dargestellt über der bezogenen Lastwechselzahl N/N_f	118
Abbildung 6.15:	Dehnungsentwicklungen dargestellt über der Lastwechselzahl N	118
Abbildung 6.16:	Dehnungsentwicklungen dargestellt über der Belastungsdauer t	119

Abbildung 6.17:	Beispielhafte Darstellung von Dehnungsentwicklungen.....	121
Abbildung 6.18:	Beispielhafte Darstellung von Steifigkeitsentwicklungen (auf Messdaten angepasste Kurvenverläufe)	122
Abbildung 6.19:	Kenngrößen der Dehnungsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung (bei Oberspannung)	125
Abbildung 6.20:	Kenngrößen der Steifigkeitsentwicklung bei Ermüdungsbeanspruchung	126
Abbildung 6.21:	Oberdehnung am Phasenübergang I/II dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang I/II (Mittelwerte)	147
Abbildung 6.22:	Oberdehnung am Phasenübergang II/III dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang II/III (Mittelwerte).....	147
Abbildung 6.23:	Unterdehnung am Phasenübergang I/II dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang I/II (Mittelwerte)	148
Abbildung 6.24:	Unterdehnung am Phasenübergang II/III dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang II/III (Mittelwerte).....	149
Abbildung 6.25:	Differenz der Ober- und Unterdehnung am Phasenübergang I/II dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang I/II (Mittelwerte).....	150
Abbildung 6.26:	Differenz der Ober- und Unterdehnung am Phasenübergang II/III dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang II/III (Mittelwerte).....	150
Abbildung 6.27:	Gesamtdehnungszuwachs bei Oberspannung dargestellt über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl (Mittelwerte)	152
Abbildung 6.28:	Bruchdehnung dargestellt über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl (Mittelwerte).....	153
Abbildung 6.29:	Obere Enddehnung dargestellt über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl (Mittelwerte).....	153
Abbildung 6.30:	Logarithmierte Steigung der Oberdehnung in der zweiten Phase dargestellt über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl (Einzelwerte).....	155
Abbildung 6.31:	Logarithmierte Steigung der Oberdehnung in der zweiten Phase dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen (Einzelwerte).....	155
Abbildung 6.32:	Vergleich der Regressionsgeraden der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in Phase II für normal-, hoch-, und ultra-hochfeste Betone.....	158
Abbildung 6.33:	Steifigkeit am Phasenübergang I/II dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang I/II (Mittelwerte)	159
Abbildung 6.34:	Steifigkeit am Phasenübergang II/III dargestellt über der logarithmierten Lastwechselzahl am Phasenübergang II/III (Mittelwerte).....	159
Abbildung 6.35:	Prozentualer Steifigkeitsverlust in der zweiten Phase der Steifigkeitsentwicklung dargestellt über der Lastwechselzahl am Übergang II/III (Mittelwerte)	160
Abbildung 6.36:	Logarithmiertes Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase dargestellt über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl (Einzelwerte)	161
Abbildung 7.1:	Kenngrößen der Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung	167
Abbildung 7.2:	Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,90$	168
Abbildung 7.3:	Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,80$	168
Abbildung 7.4:	Dehnungszuwachs in der Frühphase bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,90$	173

Abbildung 7.5:	Dehnungszuwachs in der Frühphase bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,80$	173
Abbildung 7.6:	Spannungs-Dehnungslinien bei Prüfung der Restfestigkeiten ($S_D = 0,80$).....	174
Abbildung 8.1:	Vergleich des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung, B21, $S_O = 0,80$, $k = 44,53 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$	182
Abbildung 8.2:	Vergleich des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung, B21, $S_O = 0,80$, $k = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$	182
Abbildung 8.3:	Vergleich des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung, B23, $S_O = 0,80$, $k = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$	184
Abbildung 8.4:	Vergleich des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung, B23, $S_O = 0,90$, $k = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$	184
Abbildung 8.5:	Schematische Darstellung des Envelope-Konzepts bei kraft geregelter monoton steigender und zyklischer Belastung	185
Abbildung 8.6:	Verwendete Kenngrößen für den Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung.....	191
Abbildung 8.7:	Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_O = 0,90$, $f_P = 0,86 \text{ Hz}$, $k = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,90$	192
Abbildung 8.8:	Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_O = 0,80$, $f_P = 0,98 \text{ Hz}$, $k = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,90$	193
Abbildung 8.9:	Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_O = 0,80$, $f_P = 9,76 \text{ Hz}$, $k = 4453 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,90$	194
Abbildung 8.10:	Dehnung infolge Ermüdungs- und Dauerstandbeanspruchung am Phasenübergang I/II (Einzelwerte)	197
Abbildung 8.11:	Dehnung infolge Ermüdungs- und Dauerstandbeanspruchung am Phasenübergang II/III (Einzelwerte)	197
Abbildung 8.12:	Logarithmierte Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen (Einzelwerte)	199
Abbildung 8.13:	Bruchdehnungen der Dauerstandversuche und der zyklischen Versuche dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen (Einzelwerte)	199
Abbildung 8.14:	Dreiecksversuche: Wöhlerdiagramm mit ursprünglichen und umgerechneten Beanspruchungsniveaus (Einzelwerte).....	204
Abbildung 8.15:	Sinusversuche: Wöhlerdiagramm mit ursprünglichen und umgerechneten Beanspruchungsniveaus (Einzelwerte).....	206
Abbildung 8.16:	Wöhlerdiagramm der Sinusversuche unter Berücksichtigung der umgerechneten Beanspruchungsniveaus (Einzelwerte)	208
Abbildung 8.17:	Wöhlerdiagramm der Sinusversuche unter Berücksichtigung der ursprünglichen Beanspruchungsniveaus (Einzelwerte).....	208
Abbildung 8.18:	Zusammenhang zwischen der bezogenen Oberspannung und der Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase (Sinusversuche, Einzelwerte).....	212
Abbildung 8.19:	Zusammenhang zwischen der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der umgerechneten bezogenen Oberspannung (Sinusversuche)	213

Abbildung 10.1:	Dehnungsanteile im Lastwechsel (Modellebene „Lastwechsel“) (angelehnt an [Schwabach – 2005]).....	224
Abbildung 10.2:	(Akkumulierte) Dehnungsanteile im Ermüdungsprozess (Modellebene „Ermüdungsprozess“) (angelehnt an [Pfister – 2007]).....	226
Abbildung 10.3:	Verlauf viskoser Dehnungen bei konstanter Beanspruchung unterschiedlicher Höhe (schematisch)	230
Abbildung 10.4:	Verlauf viskoser Dehnungen bei konstanter Beanspruchung mit unterschiedlicher Dauer (schematisch).....	234
Abbildung 10.5:	Anstieg der bleibenden Dehnungen im Lastwechsel (schematisch).....	235

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Dauerstandfestigkeit in Abhängigkeit der Betonfestigkeiten (nach [Iravani / MacGregor – 1998])	49
Tabelle 4.1:	Übersicht über die Versuche mit monoton steigender Beanspruchung unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeiten	70
Tabelle 4.2:	Übersicht über die Ermüdungsversuche	73
Tabelle 4.3:	Übersicht über die Dauerstandversuche	77
Tabelle 5.1:	Untersuchte Beanspruchungsgeschwindigkeiten.....	86
Tabelle 6.1:	Phasenübergänge: Einfluss der bezogenen Oberspannung.....	129
Tabelle 6.2:	Dehnungsentwicklung: Einfluss der bezogenen Oberspannung.....	131
Tabelle 6.3:	Steifigkeitsentwicklung: Einfluss der bezogenen Oberspannung.....	132
Tabelle 6.4:	Phasenübergänge: Einfluss der Belastungsfrequenz (Sinus).....	134
Tabelle 6.5:	Phasenübergänge: Einfluss der Belastungsfrequenz (Dreieck)	134
Tabelle 6.6:	Dehnungsentwicklung: Einfluss der Belastungsfrequenz (Sinus).....	136
Tabelle 6.7:	Dehnungsentwicklung: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit (Dreieck)	137
Tabelle 6.8:	Steifigkeitsentwicklung: Einfluss der Belastungsfrequenz (Sinus).....	139
Tabelle 6.9:	Steifigkeitsentwicklung: Einfluss der Belastungsfrequenz (Dreieck)	139
Tabelle 6.10:	Phasenübergänge: Einfluss der Wellenform.....	142
Tabelle 6.11:	Dehnungsentwicklung: Einfluss der Wellenform.....	143
Tabelle 6.12:	Steifigkeitsentwicklung: Einfluss der Wellenform.....	144
Tabelle 7.1:	Spannungs- und Dehnungswerte bei Prüfung der Restfestigkeiten.....	175
Tabelle 8.1:	Vergleich der Kenngrößen der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung (Mittelwerte).....	195

Anhang

A-1 Statistische Kurzauswertung der 28-Tage-Druckfestigkeiten

A-1.1 Prüfungen an 150er Würfeln

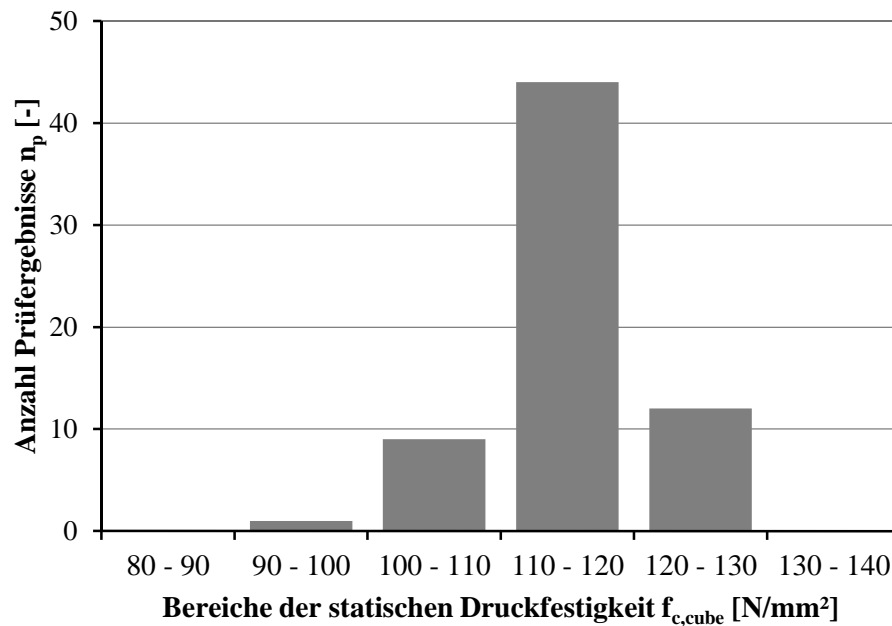


Abbildung A 1.1: Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeit geprüft an wassergelagerten Würfeln mit 150 mm Kantenlänge

Kurzauswertung			
Anzahl Prüfergebnisse	n_p	66	[-]
Mittelwert	$f_{cm,cube}$	115,5	[N/mm ²]
Standardabweichung	s	5,15	[N/mm ²]
5%-Quantilwert		107	[N/mm ²]

Tabelle A 1.1: Statistische Kurzauswertung der Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeit geprüft an wassergelagerten Würfeln mit 150 mm Kantenlänge

A-1.2 Referenzversuche

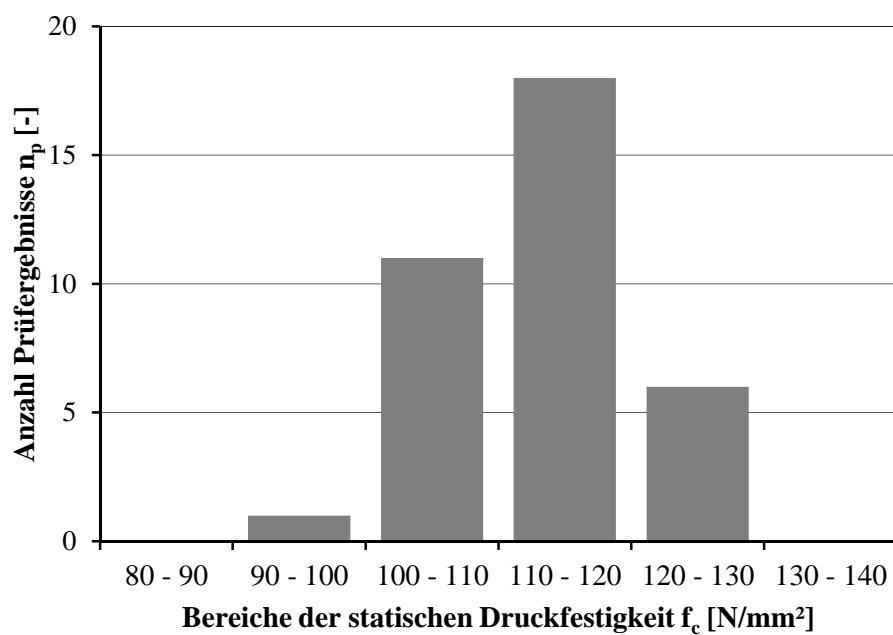


Abbildung A 1.2: Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeit geprüft an Zylindern $d/h = 60/180$ mm

Kurzauswertung			
Anzahl Prüfergebnisse	n_p	36	[-]
Mittelwert	f_{cm}	112,5	[N/mm ²]
Standardabweichung	s	6,65	[N/mm ²]
5%-Quantilwert		102	[N/mm ²]

Tabelle A 1.2: Statistische Kurzauswertung der Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeit geprüft an Zylindern $d/h = 60/180$ mm

A-2 Versuche mit monoton steigender Beanspruchung

A-2.1 Spannungs-Dehnungslinien

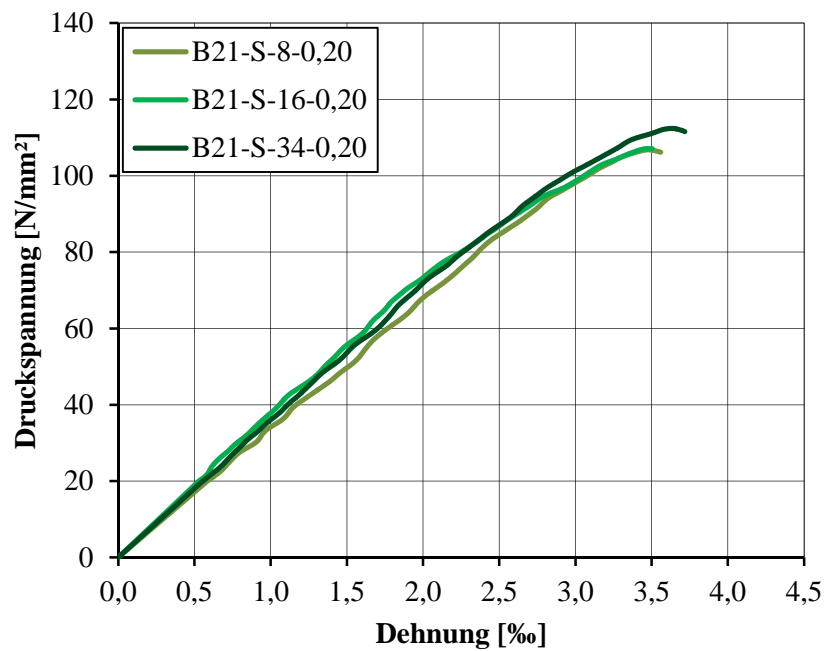


Abbildung A 2.1: Spannungs-Dehnungslinien B21, $\dot{w} = 0,20 \text{ mm/min}$

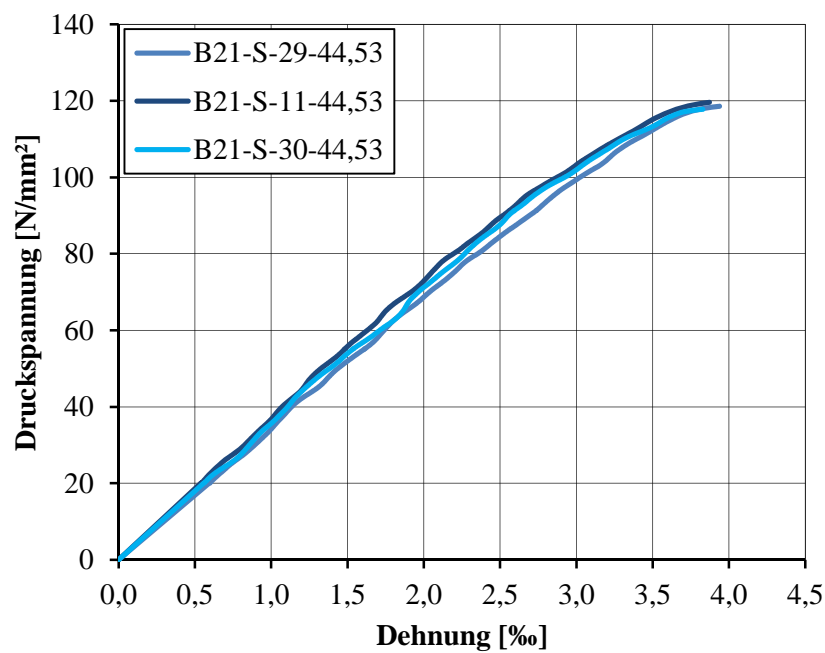


Abbildung A 2.2: Spannungs-Dehnungslinien B21, $\dot{k} = 44,53 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$

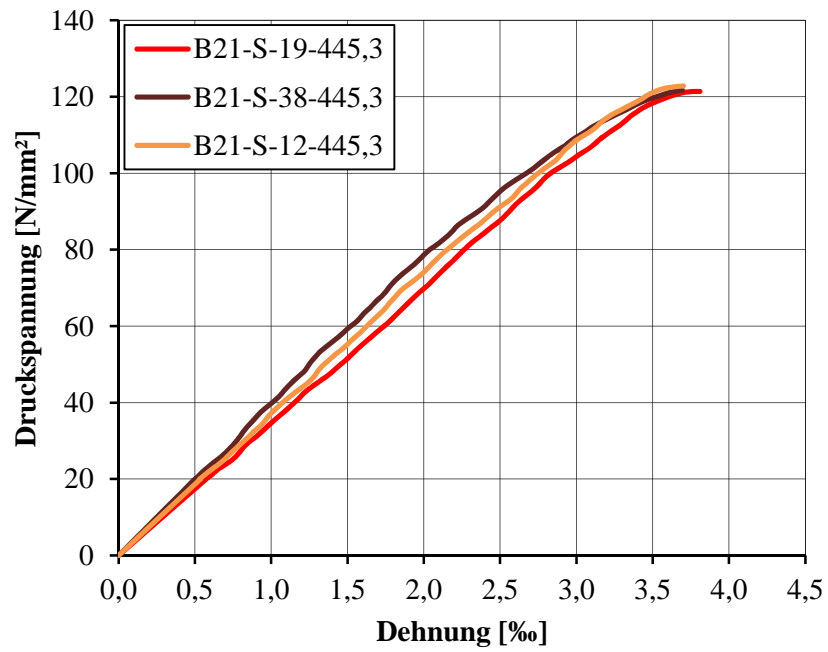


Abbildung A 2.3: Spannungs-Dehnungslinien B21, $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$

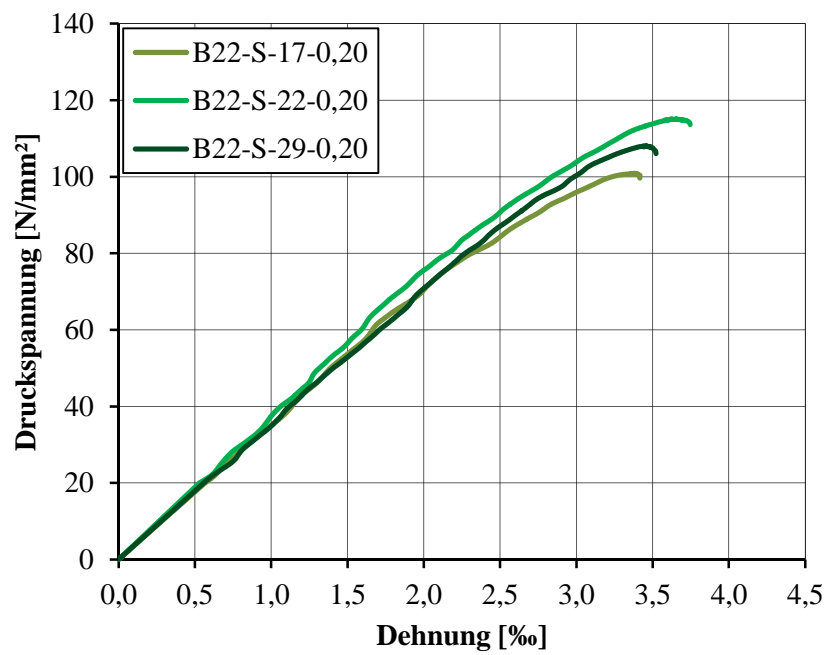
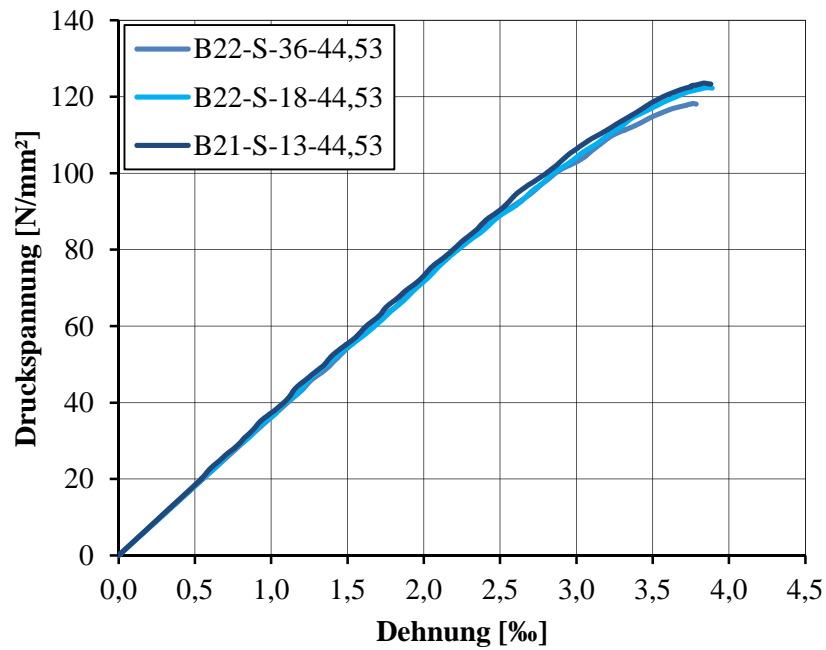
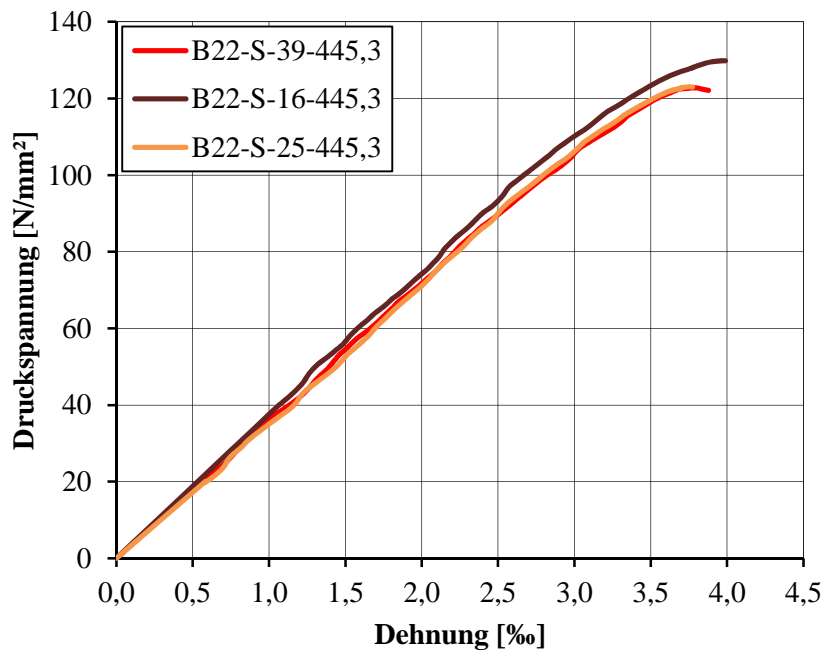


Abbildung A 2.4: Spannungs-Dehnungslinien B22, $\dot{w} = 0,20 \text{ mm/min}$

Abbildung A 2.5: Spannungs-Dehnungslinien B22, $\dot{k} = 44,53 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ Abbildung A 2.6: Spannungs-Dehnungslinien B22, $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$

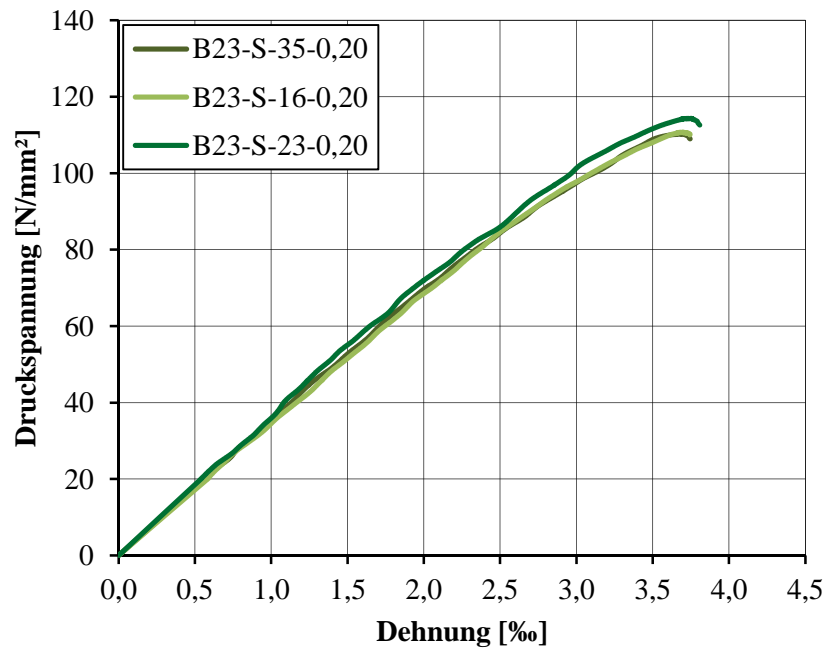


Abbildung A 2.7: Spannungs-Dehnungslinien B23, $\dot{w} = 0,20 \text{ mm/min}$

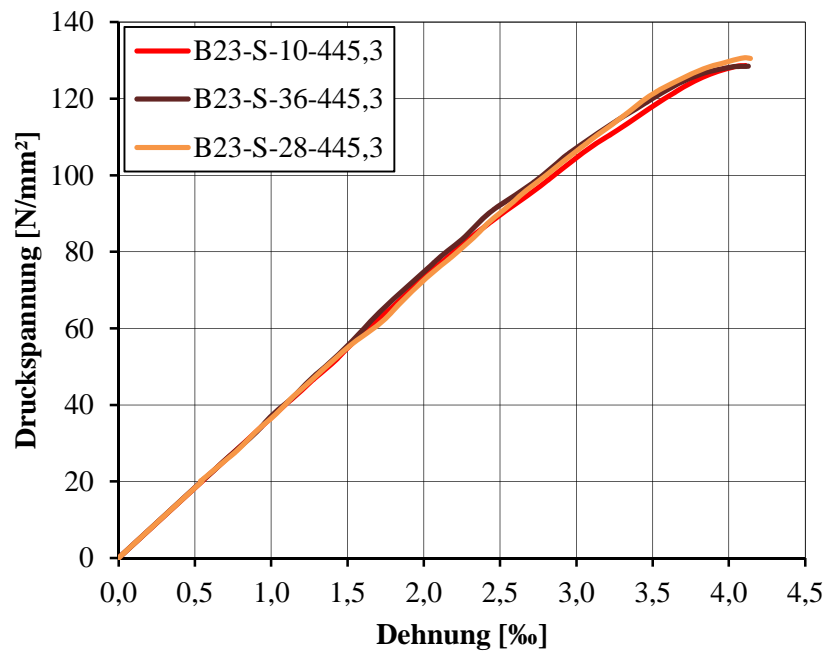


Abbildung A 2.8: Spannungs-Dehnungslinien B23, $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$

A-2.2 Druckfestigkeiten, Bruchspannungen und zugehörige Dehnungen

	Beanspruchungsgeschwindigkeit	Druckfestigkeit [N/mm ²]		Dehnung bei Druckfestigkeit [‰]		Bruchspannung [N/mm ²]		Bruchdehnung [‰]	
		\dot{k} bzw. \dot{w}	f_c	f_{cm}	ϵ_c	ϵ_{cm}	σ_{cu}	σ_{cum}	ϵ_{cu}
Charge B21	0,20 mm/min (ca. 1 kN·s ⁻¹)	107,1	109,0	3,49	3,55	106,0	108,0	3,59	3,62
		107,4		3,50		106,9		3,52	
		112,6		3,65		111,0		3,74	
	44,53 kN·s ⁻¹	118,2	118,9	3,84	3,86	118,7	118,7	4,00	3,94
		119,9		3,91		119,8		3,93	
		118,5		3,83		117,8		3,89	
	445,3 kN·s ⁻¹	121,7	122,2	3,75	3,71	121,3	121,9	3,85	3,77
		122,0		3,67		121,6		3,72	
		123,0		3,70		122,9		3,75	
Charge B22	0,20 mm/min (ca. 1 kN·s ⁻¹)	100,9	108,0	3,38	3,49	99,6	106,5	3,42	3,56
		115,1		3,65		113,7		3,75	
		108,2		3,44		106,1		3,52	
	44,53 kN·s ⁻¹	118,3	121,4	3,73	3,79	118,1	121,2	3,79	3,85
		122,5		3,82		122,2		3,89	
		123,6		3,84		123,3		3,88	
	445,3 kN·s ⁻¹	123,1	125,3	3,76	3,84	123,0	125,0	3,77	3,87
		122,8		3,78		122,1		3,88	
		130,1		3,97		130,0		3,97	
Charge B23	0,20 mm/min (ca. 1 kN·s ⁻¹)	110,3	111,8	3,67	3,71	109,0	110,5	3,75	3,77
		110,7		3,70		110,0		3,74	
		114,3		3,75		112,6		3,81	
	445,3 kN·s ⁻¹	128,8	129,5	4,06	4,07	128,7	129,3	4,11	4,13
		128,9		4,04		128,7		4,13	
		130,7		4,11		130,5		4,14	

Tabelle A 2.1: Druckfestigkeiten, Bruchspannungen und zugehörige Dehnungen
(B21, B22 und B23)

	Beanspruch.- geschwindig- keit	Druckfestig- keit [N/mm ²]		Dehnung bei Druckfestigkeit [‰]		Bruch- spannung [N/mm ²]		Bruchdehnung [‰]	
	\dot{k} bzw. \dot{w}	f_c	f_{cm}	ε_c	ε_{cm}	σ_{cu}	σ_{cum}	ε_{cu}	ε_{cum}
Charge B19	0,20 mm/min (ca. 1 kN·s ⁻¹)	125,1	121,4	-		-		-	
		116,0		-		-		-	
		123,0		-		-		-	
	4,453 kN·s ⁻¹	126,8	125,0	3,83	3,708	126,7	124,9	3,85	3,74
		131,7		3,91		131,5		3,93	
		125,1		3,59		125,0		3,60	
		121,5		3,78		121,4		3,81	
		121,7		3,65		121,7		3,67	
		122,9		3,50		122,9		3,56	
	44,53 kN·s ⁻¹	129,4	127,2	3,88	3,669	129,4	125,9	3,90	3,69
		124,4		3,61		124,4		3,61	
		131,2		3,74		131,0		3,77	
		119,6		3,44		119,0		3,49	
		123,5	-	-	-	-	-	-	
		133,2	-	-	-	-	-	-	
		130,7	-	-	-	-	-	-	
		126,5	-	-	-	-	-	-	
		125,9	-	-	-	-	-	-	
	445,3 kN·s ⁻¹	133,5	136,3	3,88	3,84	133,3	135,7	3,89	3,87
		147,3		4,13		147,3		4,13	
		130,2		3,80		132,1		3,85	
		132,6		3,58		130,0		3,62	
		136,4	-	-	-	-	-	-	
		135,4	-	-	-	-	-	-	
		137,6	-	-	-	-	-	-	
		136,4	-	-	-	-	-	-	
		137,6	-	-	-	-	-	-	

Tabelle A 2.2: Druckfestigkeiten, Bruchspannungen und zugehörige Dehnungen (B19)

	Beanspruch.- geschwindig- keit	Druckfestig- keit [N/mm ²]		Dehnung bei Druckfestigkeit [‰]		Bruch- spannung [N/mm ²]		Bruchdehnung [‰]		
		\dot{k} bzw. \dot{w}	f_c	f_{cm}	ε_c	ε_{cm}	σ_{cu}	σ_{cum}	ε_{cu}	ε_{cum}
Charge B19	4453 kN·s ⁻¹	142,5	142,0	4,12	4,15	142,5	142,0	4,12	4,15	
		142,4		4,30		142,4		4,30		
		144,4		4,13		144,4		4,13		
		144,7		4,07		144,7		4,07		
		140,3		-	-	140,3		-		-
		140,0		-	-	140,0		-		-
		139,4		-	-	139,4		-		-
		145,3		-	-	145,3		-		-
		139,3		-	-	139,3		-		-

Tabelle A 2.3: Druckfestigkeiten, Bruchspannungen und zugehörige Dehnungen (B19)
(Fortsetzung)

A-2.3 Regressionen der Druckfestigkeitssteigerung

Die Regressionsgeraden wurden unter Berücksichtigung der Mittelwerte der Druckfestigkeiten ermittelt.

Charge B12:

$$f_{cm} = 6,998 \cdot \log v + 114,4 \quad r^2 = 1,0 \quad n = 2 \quad (\text{A 2.1})$$

Charge B13:

$$f_{cm} = 5,676 \cdot \log v + 103,6 \quad r^2 = 1,0 \quad n = 2 \quad (\text{A 2.2})$$

Charge B14:

$$f_{cm} = 8,088 \cdot \log v + 102,0 \quad r^2 = 1,0 \quad n = 2 \quad (\text{A 2.3})$$

Charge B19:

$$f_{cm} = 5,702 \cdot \log v + 120,6 \quad r^2 = 0,966 \quad n = 5 \quad (\text{A 2.4})$$

Charge B21:

$$f_{cm} = 5,082 \cdot \log v + 109,4 \quad r^2 = 0,982 \quad n = 3 \quad (\text{A 2.5})$$

Charge B22:

$$f_{\text{cm}} = 6,678 \cdot \log v + 108,7 \quad r^2 = 0,972 \quad n = 3 \quad (\text{A 2.6})$$

Charge B23:

$$f_{\text{cm}} = 6,691 \cdot \log v + 111,8 \quad r^2 = 1,0 \quad n = 2 \quad (\text{A 2.7})$$

A-3 Ermüdungsversuche

A-3.1 Bruchlastwechselzahlen

A-3.1.1 Werte der Bruchlastwechselzahlen

VB	Probe	F_{cm} [kN]	$S_O : S_U$ [-]	WF	f_p [Hz]	N_f [-]	$\log N_f$ [-]	Bemerkung
EI	B1-13	313,9	0,60 : 0,05	Sin	10,0	1.978.959	6,30	A ; d
	B1-14	313,9		Sin	10,0	1.995.893	6,30	A ; d
	B1-16	313,9		Sin	10,0	2.003.199	6,30	A ; d
	B2-10	306,2	0,80 : 0,05	Sin	10,0	6.206	3,79	A
	B2-11	306,2		Sin	10,0	1.764	3,25	A
	B2-12	306,2		Sin	10,0	7.963	3,90	A
	B2-14	306,2		Sin	10,0	1.959	3,29	A
	B2-13	306,2		Sin	10,0	5.026	3,70	A
	B2-16	306,2	0,70 : 0,05	Sin	10,0	4.442	3,65	A
	B2-17	306,2		Sin	10,0	22.276	4,35	A
	B2-18	306,2		Sin	10,0	18.192	4,26	A
	B2-23	306,2		Sin	10,0	45.012	4,65	A
	B2-24	306,2		Sin	10,0	28.297	4,45	A
	B2-21	306,2		Sin	10,0	30.366	4,48	A
	B2-29	306,2		Sin	10,0	17.952	4,25	A
A: Aufspannen der Amplitude d: Durchläufer MA: Messung ausgefallen MU: Messung unterbrochen								

Tabelle A 3.1: Bruchlastwechselzahlen der Ermüdungsversuche

VB	Probe	F _{cm} [kN]	S _O : S _U [-]	WF	f _p [Hz]	N _f [-]	log N _f [-]	Bemerkung
E2	B12-32	325,2	0,80 : 0,05	Sin	1,00	5.393	3,73	MA
	B12-33	325,2		Sin	1,00	2.989	3,48	
	B12-8	325,2		Sin	1,00	2.357	3,37	
	B12-24	325,2		Sin	1,00	2.719	3,43	
	B12-16	325,2		Sin	1,00	3.681	3,57	MU
	B12-34	325,2		Sin	1,00	3.852	3,59	
	B12-14	325,2	0,95 : 0,05	Sin	0,10	20	1,30	
	B12-30	325,2		Sin	0,10	34	1,53	
	B12-19	325,2		Sin	0,10	25	1,40	
	B12-18	325,2		Sin	0,10	15	1,18	
	B12-9	325,2		Sin	0,10	49	1,69	
	B12-36	325,2		Sin	0,10	24	1,38	
	B12-31	325,2	0,90 : 0,05	Sin	0,10	169	2,23	
	B12-25	325,2		Sin	0,10	133	2,12	
	B12-21	325,2		Sin	0,10	156	2,19	
	B12-10	325,2		Sin	0,10	61	1,79	
	B12-27	325,2		Sin	0,10	63	1,80	
	B12-26	325,2		Sin	0,10	91	1,96	
	B12-20	325,2	0,80 : 0,05	Sin	0,10	846	2,93	
	B12-12	325,2		Sin	0,10	1.180	3,07	
	B12-35	325,2		Sin	0,10	1.249	3,10	
	B12-13	325,2		Sin	0,10	624	2,80	
	B12-15	325,2		Sin	0,10	405	2,61	
	B12-28	325,2		Sin	0,10	1.192	3,08	
	B12-29	325,2		Sin	0,10	1.045	3,02	
	B13-9	284,1	0,80 : 0,05	Sin	10,0	4.206	3,62	A
	B13-25	284,1		Sin	10,0	6.279	3,80	A
	B13-17	284,1		Sin	10,0	5.231	3,72	A
	B13-13	284,1		Sin	10,0	4.343	3,64	A
	B13-16	284,1		Sin	10,0	5.123	3,71	A
B13-19	284,1	Sin		10,0	3.720	3,57	A	
A: Aufspannen der Amplitude d: Durchläufer MA: Messung ausgefallen MU: Messung unterbrochen								

Tabelle A 3.2: Bruchlastwechselzahlen der Ermüdungsversuche

VB	Probe	F _{cm} [kN]	S _O : S _U [-]	WF	f _p [Hz]	N _f [-]	log N _f [-]	Bemerkung
E2	B13-26	284,1	0,80 : 0,05	Sin	10,0	5.157	3,71	
	B13-32	284,1		Sin	10,0	4.278	3,63	
	B13-12	284,1		Sin	10,0	5.716	3,76	
	B13-29	284,1		Sin	10,0	5.656	3,75	
	B13-22	284,1		Sin	10,0	9.187	3,96	
	B13-27	284,1		Sin	10,0	6.057	3,78	
	B13-21	284,1	0,80 : 0,05	Sin	1,00	2.374	3,38	
	B13-24	284,1		Sin	1,00	2.295	3,36	
	B13-8	284,1		Sin	1,00	1.407	3,15	
	B13-31	284,1		Sin	1,00	2.260	3,35	
	B13-15	284,1		Sin	1,00	1.412	3,15	
	B13-10	284,1		Sin	1,00	1.680	3,23	
	B14-37	281,7	0,95 : 0,05	Sin	1,00	234	2,37	
	B14-33	281,7		Sin	1,00	149	2,17	
	B14-32	281,7		Sin	1,00	118	2,07	
	B14-20	281,7		Sin	1,00	212	2,33	
	B14-36	281,7		Sin	1,00	236	2,37	
	B14-17	281,7		Sin	1,00	108	2,03	
	B14-24	281,7	0,90 : 0,05	Sin	1,00	1.186	3,07	
	B14-19	281,7		Sin	1,00	945	2,98	MA
	B14-21	281,7		Sin	1,00	763	2,88	
	B14-38	281,7		Sin	1,00	738	2,87	
	B14-22	281,7		Sin	1,00	554	2,74	
	B14-23	281,7		Sin	1,00	557	2,75	
	B14-13	281,7	0,80 : 0,05	Sin	1,00	955	2,98	
	B14-35	281,7		Sin	1,00	1.547	3,19	
	B14-27	281,7		Sin	1,00	1.920	3,28	
	B14-14	281,7		Sin	1,00	2.042	3,31	
	B14-28	281,7		Sin	1,00	1.499	3,18	
	B14-9	281,7		Sin	1,00	1.847	3,27	MA
B14-18	281,7	Sin		1,00	4.513	3,65		
A: Aufspannen der Amplitude d: Durchläufer MA: Messung ausgefallen MU: Messung unterbrochen								

Tabelle A 3.3: Bruchlastwechselzahlen der Ermüdungsversuche (Fortsetzung)

VB	Probe	F _{cm} [kN]	S _O : S _U [-]	WF	f _p [Hz]	N _f [-]	log N _f [-]	Bemerkung
E3	B18-7	328,4	0,95 : 0,05	Sin	5,0	128	2,11	
	B18-16	328,4		Sin	5,0	159	2,20	
	B18-35	328,4		Sin	5,0	162	2,21	
	B18-37	328,4		Sin	5,0	7	0,85	
	B18-17	328,4		Sin	5,0	5	0,70	
	B18-29	328,4		Sin	5,0	201	2,30	
	B18-33	328,4		Sin	5,0	54	1,73	
	B18-31	328,4		Sin	5,0	62	1,79	
	B18-18	328,4	0,90 : 0,05	Sin	5,0	1.927	3,28	
	B18-23	328,4		Sin	5,0	2.293	3,36	
	B18-20	328,4		Sin	5,0	119	2,08	
	B18-21	328,4		Sin	5,0	74	1,87	
	B18-36	328,4		Sin	5,0	1.126	3,05	
	B18-13	328,4		Sin	5,0	920	2,96	
	B18-32	328,4		Sin	5,0	3.428	3,54	
	B18-27	328,4	0,80 : 0,05	Sin	5,0	499	2,70	
	B18-28	328,4		Sin	5,0	1.232	3,09	
	B18-25	328,4		Sin	5,0	6.375	3,80	
	B18-41	328,4		Sin	5,0	7.597	3,88	
	B18-10	328,4		Sin	5,0	5.175	3,71	
	B18-12	328,4		Sin	5,0	6.038	3,78	
	B18-34	328,4		Sin	5,0	1.091	3,04	
	B18-15	328,4		Sin	5,0	895	2,95	
	B18-30	328,4	0,70 : 0,05	Sin	5,0	21.923	4,34	
	B18-39	328,4		Sin	5,0	27.835	4,44	
	B18-26	328,4		Sin	5,0	27.471	4,44	
	B18-9	328,4		Sin	5,0	114.620	5,06	
	B18-24	328,4		Sin	5,0	42.037	4,62	
B18-40	328,4	Sin		5,0	72.805	4,86		
B18-42	328,4	Sin		5,0	60.463	4,78		
B18-38	328,4	Sin		5,0	36.782	4,57		
B18-22	328,4	Sin	5,0	33.979	4,53			
A: Aufspannen der Amplitude d: Durchläufer MA: Messung ausgefallen MU: Messung unterbrochen								

Tabelle A 3.4: Bruchlastwechselzahlen der Ermüdungsversuche (Fortsetzung)

VB	Probe	F _{cm} [kN]	S _O : S _U [-]	WF	f _p [Hz]	N _f [-]	log N _f [-]	Bemerkung	
E4	B21-13	296,9	0,80 : 0,05	Sin	1,00	1.890	3,28		
	B21-37	296,9		Sin	1,00	2.434	3,39		
	B21-40	296,9		Sin	1,00	2.221	3,35		
	B21-39	296,9		Sin	1,00	2.088	3,32		
	B21-25	296,9		Sin	1,00	2.914	3,46		
	B21-27	296,9		Sin	1,00	2.668	3,43		
	B21-20	296,9	0,80 : 0,05	Sin	0,10	334	2,52		
	B21-18	296,9		Sin	0,10	577	2,76		
	B21-14	296,9		Sin	0,10	933	2,97		
	B21-32	296,9		Sin	0,10	1.737	3,24		
	B21-22	296,9		Sin	0,10	337	2,53		
	B21-23	296,9		Sin	0,10	179	2,25		
	B21-15	296,9	0,80 : 0,05	Dr	1,00	3.217	3,51		
	B21-36	296,9		Dr	1,00	3.031	3,48		
	B21-33	296,9		Dr	1,00	3.318	3,52		
	B21-26	296,9		Dr	1,00	3.875	3,59		
	B21-28	296,9		Dr	1,00	4.993	3,70		
	B21-24	296,9		Dr	1,00	9.044	3,96		
	B21-7	296,9	Dr	1,00	7.303	3,86			
	B21-10	296,9	0,80 : 0,05	Dr	0,10	3.430	3,54		
	B21-31	296,9		Dr	0,10	156	2,19		
	B21-42	296,9		Dr	0,10	997	3,00		
	B21-41	296,9		Dr	0,10	1.610	3,21		
	B21-35	296,9		Dr	0,10	693	2,84		
	B21-17	296,9		Dr	0,10	3.591	3,56		
	B21-9	296,9		Dr	0,10	8.625	3,94		
	A: Aufspannen der Amplitude d: Durchläufer MA: Messung ausgefallen MU: Messung unterbrochen								

Tabelle A 3.5: Bruchlastwechselzahlen der Ermüdungsversuche (Fortsetzung)

VB	Probe	F _{cm} [kN]	S _O : S _U [-]	WF	f _p [Hz]	N _f [-]	log N _f [-]	Bemerkung
E4	B22-38	292,9	0,90 : 0,05	Sin	0,89	82	1,91	
	B22-40	292,9		Sin	0,89	263	2,42	
	B22-27	292,9		Sin	0,89	141	2,15	
	B22-15	292,9		Sin	0,89	42	1,62	
	B22-9	292,9		Sin	0,89	53	1,72	
	B22-43	292,9		Sin	0,89	94	1,97	
	B22-32	292,9		Sin	0,89	239	2,38	
	B22-24	292,9		Sin	0,89	273	2,44	
	B22-34	292,9	0,90 : 0,05	Sin	0,09	19	1,28	
	B22-10	292,9		Sin	0,09	118	2,07	
	B22-37	292,9		Sin	0,09	84	1,92	
	B22-19	292,9		Sin	0,09	44	1,64	
	B22-31	292,9		Sin	0,09	140	2,15	
	B22-23	292,9		Sin	0,09	112	2,05	
	B22-14	292,9		Sin	0,09	64	1,81	
	B22-28	292,9	0,90 : 0,05	Dr	0,89	134	2,13	
	B22-8	292,9		Dr	0,89	371	2,57	
	B22-11	292,9		Dr	0,89	302	2,48	
	B22-35	292,9		Dr	0,89	707	2,85	
	B22-41	292,9		Dr	0,89	366	2,56	
	B22-7	292,9		Dr	0,89	603	2,78	
	B22-20	292,9	0,90 : 0,05	Dr	0,09	95	1,98	
	B22-26	292,9		Dr	0,09	261	2,42	
	B22-30	292,9		Dr	0,09	192	2,28	
B22-42	292,9	Dr		0,09	141	2,15		
B22-33	292,9	Dr		0,09	191	2,28		
B22-21	292,9	Dr		0,09	243	2,39		
A: Aufspannen der Amplitude d: Durchläufer MA: Messung ausgefallen MU: Messung unterbrochen								

Tabelle A 3.6: Bruchlastwechselzahlen der Ermüdungsversuche (Fortsetzung)

VB	Probe	F_{cm} [kN]	$S_O : S_U$ [-]	WF	f_p [Hz]	N_f [-]	$\log N_f$ [-]	Bemerkung
E4	B23-14	304,3	0,90 : 0,05	Dr	0,86	291	2,46	
	B23-19	304,3		Dr	0,86	215	2,33	
	B23-33	304,3		Dr	0,86	328	2,52	
	B23-22	304,3		Dr	0,86	409	2,61	
	B23-12	304,3		Dr	0,86	322	2,51	
	B23-25	304,3		Dr	0,86	316	2,50	
	B23-15	304,3	0,80 : 0,05	Dr	0,98	4.335	3,64	
	B23-42	304,3		Dr	0,98	3.859	3,59	
	B23-30	304,3		Dr	0,98	3.236	3,51	
	B23-40	304,3		Dr	0,98	3.776	3,58	
	B23-9	304,3		Dr	0,98	5.537	3,74	
	B23-31	304,3		Dr	0,98	4.416	3,65	
	B23-8	304,3	0,80 : 0,05	Dr	9,76	8.757	3,94	
	B23-24	304,3		Dr	9,76	8.887	3,95	
	B23-39	304,3		Dr	9,76	6.975	3,84	
	B23-32	304,3		Dr	9,76	8.491	3,93	
	B23-37	304,3		Dr	9,76	6.191	3,79	
	A: Aufspannen der Amplitude d: Durchläufer MA: Messung ausgefallen MU: Messung unterbrochen							

Tabelle A 3.7: Bruchlastwechselzahlen der Ermüdungsversuche (Fortsetzung)

A-3.1.2 Statistische Auswertungen der Bruchlastwechselzahlen

VB	Charge	S _O : S _U [-]	WF	f _p [Hz]	n [-]	log N _f		Bemerkung
						\bar{x} [-]	s [-]	
E1	B2	0,80 : 0,05	Sin	10,0	6	3,60	0,27	A
	B2	0,70 : 0,05	Sin	10,0	6	4,41	0,15	A
	B1	0,60 : 0,05	Sin	10,0	3	6,30	-	A; d
E2	B12	0,80 : 0,05	Sin	1,00	6	3,53	0,13	
	B12	0,95 : 0,05	Sin	0,10	6	1,41	0,18	
	B12	0,90 : 0,05	Sin	0,10	6	2,01	0,20	
	B12	0,80 : 0,05	Sin	0,10	7	2,94	0,18	
	B13	0,80 : 0,05	Sin	10,00	6	3,68	0,08	A
	B13	0,80 : 0,05	Sin	10,00	6	3,77	0,11	
	B13	0,80 : 0,05	Sin	1,00	6	3,27	0,11	
	B14	0,95 : 0,05	Sin	1,00	6	2,22	0,15	
	B14	0,90 : 0,05	Sin	1,00	6	2,88	0,13	
B14	0,80 : 0,05	Sin	1,00	7	3,27	0,20		
E3	B18	0,95 : 0,05	Sin	5,00	8	1,74	0,63	
	B18	0,90 : 0,05	Sin	5,00	8	2,85	0,60	
	B18	0,80 : 0,05	Sin	5,00	8	3,58	0,49	
	B18	0,70 : 0,05	Sin	5,00	8	4,66	0,22	
E4	B21	0,80 : 0,05	Sin	1,00	6	3,37	0,07	
	B21	0,80 : 0,05	Sin	0,10	6	2,71	0,35	
	B21	0,80 : 0,05	Dr	1,00	7	3,66	0,19	
	B21	0,80 : 0,05	Dr	0,10	7	3,18	0,57	
	B22	0,90 : 0,05	Sin	0,89	8	2,08	0,32	
	B22	0,90 : 0,05	Sin	0,09	7	1,85	0,30	
	B22	0,90 : 0,05	Dr	0,89	6	2,56	0,26	
	B22	0,90 : 0,05	Dr	0,09	6	2,25	0,16	
	B23	0,90 : 0,05	Dr	0,86	6	2,49	0,09	
	B23	0,80 : 0,05	Dr	0,98	6	3,62	0,08	
B23	0,80 : 0,05	Dr	9,76	5	3,89	0,07		
A: Aufspannen der Amplitude d: Durchläufer MA: Messung ausgefallen MU: Messung unterbrochen								

Tabelle A 3.8: Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten Bruchlastwechselzahlen

Verglichene Stichproben				F-Test					t-Test				
Stichprobe 1	Stichprobe 2	Merkm.	Einfluss	v_1	v_2	\hat{F}	f	Ergebnis	n_1	n_2	\hat{t}	t	Ergebnis
B13-Z-0,80-10,0-Sin Ohne Aufspannen*	B13-Z-0,80-10,0-Sin Mit Aufspannen	BLZ	E	5	5	1,75	3,45	n. sig.	6	6	1,77	2,23	n. sig.
* Stichprobe mit größerer Varianz				sig.: signifikant unterschiedlich					n. sig.: nicht signifikant unterschiedlich				

Tabelle A 3.9: Signifikanztests: Einfluss des Aufspanns der Amplitude auf die Bruchlastwechselzahlen

Verglichene Stichproben				F-Test					t-Test				
Stichprobe 1	Stichprobe 2	Merkm.	Einfluss	v_1	v_2	\hat{F}	f	Ergebnis	n_1	n_2	\hat{t}	t	Ergebnis
B12-Z-0,80-1,0-Sin*	B14-Z-0,80-1,0-Sin	BLZ	Ch.	4	5	6,22	4,05	sig.	5	6	2,22	2,36	n. sig.
B12-Z-0,80-1,0-Sin	B13-Z-0,80-1,0-Sin*	BLZ	Ch.	4	5	1,44	4,05	n. sig.	5	6	3,60	2,26	sig.
B12-Z-0,80-1,0-Sin*	B21-Z-0,80-1,0-Sin	BLZ	Ch.	4	5	1,66	3,52	n. sig.	5	6	2,44	2,26	sig.
B14-Z-0,80-1,0-Sin*	B13-Z-0,80-1,0-Sin	BLZ	Ch.	5	5	4,32	3,45	sig.	6	6	0,03	2,36	n. sig.
B14-Z-0,80-1,0-Sin*	B21-Z-0,80-1,0-Sin	BLZ	Ch.	5	5	10,3	3,45	sig.	6	6	1,09	2,45	n. sig.
B13-Z-0,80-1,0-Sin*	B21-Z-0,80-1,0-Sin	BLZ	Ch.	5	5	2,39	3,45	n. sig.	6	6	1,93	2,23	n. sig.
B13-Z-0,80-10,0-Sin	B2-Z-0,80-10,0-Sin*	BLZ	Ch.	5	5	6,34	3,45	sig.	6	6	1,50	2,36	n. sig.
B21-Z-0,80-0,1-Sin*	B12-Z-0,80-0,1-Sin	BLZ	Ch.	5	6	3,80	3,11	sig.	6	7	1,43	2,36	n. sig.
* Stichprobe mit größerer Varianz				sig.: signifikant unterschiedlich					n. sig.: nicht signifikant unterschiedlich				

Tabelle A 3.10: Signifikanztests: Einfluss der Betoncharge auf die Bruchlastwechselzahlen

Verglichene Stichproben				F-Test					t-Test				
Stichprobe 1	Stichprobe 2	Merkmal	Einfluss	v_1	v_2	\hat{F}	f	Ergebnis	n_1	n_2	\hat{t}	t	Ergebnis
B12-Z-0,95-0,1-Sin	B12-Z-0,90-0,1-Sin*	BLZ	S_{max}	5	5	1,19	3,45	n. sig.	6	6	5,56	2,23	sig.
B12-Z-0,90-0,1-Sin*	B12-Z-0,80-0,1-Sin	BLZ	S_{max}	5	6	1,16	3,11	n. sig.	6	7	8,85	2,20	sig.
B14-Z-0,95-1,0-Sin*	B14-Z-0,90-1,0-Sin	BLZ	S_{max}	5	4	1,27	4,05	n. sig.	6	5	7,28	2,26	sig.
B14-Z-0,90-1,0-Sin	B14-Z-0,80-1,0-Sin*	BLZ	S_{max}	4	5	2,73	4,05	n. sig.	5	6	3,52	2,26	sig.
B23-Z-0,90-445,3-Dr*	B23-Z-0,80-445,3-Dr	BLZ	S_{max}	5	5	1,33	3,45	n. sig.	6	6	22,9	2,23	sig.
* Stichprobe mit größerer Varianz				sig.: signifikant unterschiedlich					n. sig.: nicht signifikant unterschiedlich				

Tabelle A 3.11: Signifikanztests: Einfluss der bezogenen Oberspannung auf die Bruchlastwechselzahlen

Verglichene Stichproben				F-Test					t-Test				
Stichprobe 1	Stichprobe 2	Merkmal	Einfluss	v_1	v_2	\hat{F}	f	Ergebnis	n_1	n_2	\hat{t}	t	Ergebnis
B12-Z-0,80-1,0-Sin	B12-Z-0,80-0,1-Sin*	BLZ	f_p	4	6	4,13	4,01	sig.	5	7	6,85	2,26	sig.
B13-Z-0,80-10,0-Sin*	B13-Z-0,80-1,0-Sin	BLZ	f_p	5	5	1,05	3,45	n. sig.	6	6	7,93	2,23	sig.
B21-Z-0,80-1,0-Sin	B21-Z-0,80-0,1-Sin*	BLZ	f_p	5	5	26,0	3,45	sig.	6	6	4,46	2,57	sig.
B21-Z-0,80-1,0-Dr	B21-Z-0,80-0,1-Dr*	BLZ	f_p	6	6	9,32	3,05	sig.	7	7	2,11	2,36	n. sig.
B22-Z-0,90-0,89-Dr*	B22-Z-0,90-0,09-Dr	BLZ	f_p	5	5	2,46	3,45	n. sig.	6	6	2,53	2,23	sig.
B22-Z-0,90-0,89-Sin*	B22-Z-0,90-0,09-Sin	BLZ	f_p	7	6	1,10	3,01	n. sig.	8	7	1,44	2,16	n. sig.
B23-Z-0,80-0,98-Dr*	B23-Z-0,80-9,75-Dr	BLZ	f_p	5	4	1,28	4,05	n. sig.	6	5	6,05	2,26	sig.
* Stichprobe mit größerer Varianz				sig.: signifikant unterschiedlich					n. sig.: nicht signifikant unterschiedlich				

Tabelle A 3.12: Signifikanztests: Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Bruchlastwechselzahlen

Verglichene Stichproben				F-Test					t-Test				
Stichprobe 1	Stichprobe 2	Merkm al	Ein- fluss	v_1	v_2	\hat{F}	f	Ergeb- nis	n_1	n_2	\hat{t}	t	Ergeb- nis
B21-Z-0,80-0,1-Sin*	B21-Z-0,80-0,1-Dr	BLZ	WF	5	6	2,60	3,40	n. sig.	6	7	1,74	2,20	n. sig.
B21-Z-0,80-1,0-Sin*	B21-Z-0,80-1,0-Dr	BLZ	WF	5	6	7,25	3,40	sig.	6	7	3,80	2,31	sig.
B22-Z-0,80-0,09-Sin*	B22-Z-0,80-0,09-Dr	BLZ	WF	5	6	2,87	3,40	n. sig.	6	7	2,79	2,20	sig.
B22-Z-0,80-0,89-Sin*	B22-Z-0,80-0,89-Dr	BLZ	WF	7	5	1,56	3,37	n. sig.	8	6	3,05	2,18	sig.
* Stichprobe mit größerer Varianz				sig.: signifikant unterschiedlich					n. sig.: nicht signifikant unterschiedlich				

Tabelle A 3.13: Signifikanztests: Einfluss der Wellenform auf die Bruchlastwechselzahlen

A-3.2 Dehnungs- und Steifigkeitsentwicklungen

A-3.2.1 Werte der Kenngrößen

VB	Probe	PhÜ	PhÜ	ε^M	$\varepsilon_{O,0}^{0,0}$	$\varepsilon_{O,0}^{I/II}$	$\varepsilon_{O,0}^{II/III}$	$\varepsilon_{O,0}^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{O,t}^{II}$	$\varepsilon_U^{0,0}$	$\varepsilon_U^{I/II}$	$\varepsilon_U^{II/III}$	$\varepsilon_U^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{U,t}^{II}$	ε^B
		I/II	II/III	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]
E2	B12-33	0,10	0,97	1,27	2,29	2,60	3,15	3,40	1,93E-7	1,93E-7	0,33	0,51	0,88	1,00	1,32E-7	1,32E-7	3,47
	B12-8	0,10	0,88	1,28	2,23	2,53	2,90	3,14	1,82E-7	1,82E-7	0,29	0,49	0,79	0,95	1,62E-7	1,62E-7	3,21
	B12-24	0,11	0,93	1,21	2,13	2,43	2,96	3,32	2,16E-7	2,16E-7	0,25	0,47	0,79	0,94	1,29E-7	1,29E-7	3,75
	B12-16	0,07	0,95	1,24	2,22	2,43	2,93	3,15	1,25E-7	1,25E-7	0,25	0,43	0,78	0,93	9,57E-8	9,57E-8	3,24
	B12-34	0,12	0,95	1,16	2,25	2,60	3,27	3,60	1,89E-7	1,89E-7	0,24	0,44	0,79	0,96	9,99E-8	9,99E-8	3,67
	B12-14	0,15	0,90	1,79	3,16	3,29	3,69	3,77	2,54E-5	2,54E-6	0,35	0,53	0,82	0,87	1,86E-5	1,86E-6	3,83
	B12-30	0,15	0,91	1,54	3,06	3,24	3,68	3,75	1,56E-5	1,56E-6	0,26	0,50	0,75	0,79	9,50E-6	9,50E-7	3,79
	B12-19	0,16	0,92	1,39	2,86	3,03	3,45	3,60	2,09E-5	2,09E-6	0,25	0,44	0,64	0,67	9,80E-6	9,80E-7	3,64
	B12-18	0,13	0,93	1,73	3,08	3,18	3,66	3,78	3,86E-5	3,86E-6	0,33	0,50	0,80	0,85	2,27E-5	2,27E-6	3,86
	B12-9	0,20	0,94	1,59	3,00	3,23	3,67	3,72	1,13E-5	1,13E-6	0,23	0,55	0,83	0,87	7,19E-6	7,19E-7	3,76
	B12-36	0,08	0,88	1,60	2,98	3,09	3,50	3,59	1,97E-5	1,97E-6	0,33	0,48	0,77	0,83	1,50E-5	1,50E-6	3,70
	B12-31	0,14	0,92	1,49	2,75	3,08	3,65	3,75	3,99E-6	3,99E-7	0,31	0,67	1,04	1,09	2,62E-6	2,62E-7	3,81
	B12-25	0,14	0,88	1,47	2,77	3,07	3,60	3,78	5,03E-6	5,03E-7	0,25	0,57	0,93	1,05	3,36E-6	3,36E-7	3,69
	B12-21	0,08	0,93	1,54	3,06	3,31	3,92	4,10	4,53E-6	4,53E-7	0,34	0,66	1,03	1,11	2,86E-6	2,86E-7	4,16
	B12-10	0,13	0,90	1,37	2,79	3,00	3,45	3,70	9,22E-6	9,22E-7	0,27	0,52	0,81	0,87	5,58E-6	5,58E-7	3,72
B12-27	0,11	0,95	1,67	3,07	3,25	3,82	3,99	9,90E-6	9,90E-7	0,33	0,60	0,95	1,01	6,15E-6	6,15E-7	4,07	
B12-26	0,11	0,96	1,50	2,93	3,17	3,82	4,02	7,91E-6	7,91E-7	0,34	0,51	0,89	0,93	4,36E-6	4,36E-7	4,08	

Tabelle A 3.14: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Dehnungsentwicklung

VB	Probe	PhÜ	PhÜ	ε^M	$\varepsilon_o^{0,0}$	$\varepsilon_o^{I/II}$	$\varepsilon_o^{II/III}$	$\varepsilon_o^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{O,t}^{II}$	$\varepsilon_U^{0,0}$	$\varepsilon_U^{I/II}$	$\varepsilon_U^{II/III}$	$\varepsilon_U^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{U,t}^{II}$	ε^B
		I/II	II/III	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]
E2	B12-20	0,11	0,91	1,28	2,49	2,84	3,51	3,77	9,41E-7	9,41E-8	0,21	0,56	0,99	1,13	6,07E-7	6,07E-8	3,76
	B12-12	0,09	0,92	1,28	2,51	2,91	3,67	3,92	7,32E-7	7,32E-8	0,21	0,55	1,10	1,24	5,08E-7	5,08E-8	3,94
	B12-35	0,18	0,95	1,29	2,48	3,03	3,71	3,89	6,54E-7	6,54E-8	0,22	0,66	1,16	1,25	5,15E-7	5,15E-8	3,89
	B12-13	0,10	0,96	1,34	2,51	2,86	3,47	3,58	1,09E-6	1,09E-7	0,24	0,53	0,98	1,04	8,54E-7	8,54E-8	3,84
	B12-15	0,18	0,96	1,20	2,36	2,80	3,43	3,57	1,84E-6	1,84E-7	0,18	0,52	0,91	0,95	1,10E-6	1,10E-7	3,66
	B12-28	0,14	0,93	1,26	2,40	2,87	3,48	3,72	5,96E-7	5,96E-8	0,24	0,61	1,12	1,21	5,25E-7	5,25E-8	3,72
	B12-29	0,13	0,94	1,36	2,52	3,02	3,69	3,94	7,25E-7	7,25E-8	0,30	0,62	1,16	1,27	5,72E-7	5,72E-8	3,99
	B13-26	0,05	0,94	1,06	1,95	2,19	2,68	3,10	9,59E-8	9,59E-7	0,24	0,23	0,59	0,82	6,23E-8	6,23E-7	2,93
	B13-32	0,12	0,88	0,95	1,82	2,07	2,51	2,86	1,18E-7	1,18E-6	0,20	0,32	0,52	0,76	5,27E-8	5,27E-7	3,29
	B13-12	0,06	0,88	1,15	2,00	2,21	2,75	3,33	1,08E-7	1,08E-6	0,32	0,39	0,70	0,89	5,99E-8	5,99E-7	3,37
	B13-29	0,07	0,94	1,15	2,11	2,31	2,76	3,20	8,68E-8	8,68E-7	0,28	0,45	0,76	0,94	5,90E-8	5,90E-7	3,25
	B13-22	0,08	0,89	1,13	2,05	2,23	2,76	3,37	6,53E-8	6,53E-7	0,23	0,41	0,77	1,06	4,26E-8	4,26E-7	3,31
	B13-27	0,10	0,89	0,86	1,82	2,00	2,37	3,00	7,03E-8	7,03E-7	0,11	0,31	0,52	0,74	4,33E-8	4,33E-7	3,17
	B13-21	0,08	0,93	0,97	1,92	2,17	2,70	2,96	2,56E-7	2,56E-7	0,18	0,31	0,66	0,82	1,42E-7	1,42E-7	3,11
	B13-24	0,14	0,90	0,78	1,69	2,00	2,39	2,63	2,00E-7	2,00E-7	0,10	0,20	0,48	0,58	1,54E-7	1,54E-7	2,78
	B13-8	0,14	0,90	1,16	2,12	2,38	2,84	3,19	4,07E-7	4,07E-7	0,26	0,46	0,77	0,92	2,37E-7	2,37E-7	3,36
B13-31	0,13	0,93	1,15	1,95	2,33	2,85	3,22	2,63E-7	2,63E-7	0,25	0,47	0,85	1,01	2,00E-7	2,00E-7	3,36	
B13-15	0,11	0,92	1,10	2,04	2,40	2,99	3,31	4,56E-7	4,56E-7	0,27	0,50	0,84	0,99	2,74E-7	2,74E-7	3,39	
B13-10	0,12	0,96	1,17	2,14	2,45	2,98	3,33	3,45E-7	3,45E-7	0,26	0,49	0,93	1,05	2,88E-7	2,88E-7	3,48	

Tabelle A 3.15: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Dehnungsentwicklung (Fortsetzung)

VB	Probe	PhÜ	PhÜ	ε^M	$\varepsilon_o^{0,0}$	$\varepsilon_o^{I/II}$	$\varepsilon_o^{II/III}$	$\varepsilon_o^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{o,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{o,t}^{II}$	$\varepsilon_U^{0,0}$	$\varepsilon_U^{I/II}$	$\varepsilon_U^{II/III}$	$\varepsilon_U^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{U,t}^{II}$	ε^B
		I/II	II/III	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]
E2	B14-37	0,07	0,91	1,27	2,40	2,58	2,96	3,24	1,90E-6	1,90E-6	0,27	0,40	0,67	0,76	1,28E-6	1,28E-6	3,32
	B14-33	0,07	0,98	1,30	2,36	2,54	3,00	3,23	3,30E-6	3,30E-6	0,26	0,40	0,64	0,73	1,68E-6	1,68E-6	3,38
	B14-32	0,08	0,94	1,40	2,56	2,75	3,17	3,34	3,78E-6	3,78E-6	0,30	0,51	0,78	0,84	2,44E-6	2,44E-6	3,44
	B14-20	0,12	0,97	1,25	2,29	2,54	2,93	2,97	1,94E-6	1,94E-6	0,22	0,39	0,65	0,68	1,34E-6	1,34E-6	3,22
	B14-36	0,19	0,86	1,35	2,49	2,80	3,11	3,28	1,85E-6	1,85E-6	0,24	0,51	0,72	0,80	1,26E-6	1,26E-6	3,32
	B14-17	0,11	0,91	1,27	2,42	2,61	2,99	3,18	3,79E-6	3,79E-6	0,28	0,41	0,63	0,68	2,41E-6	2,41E-6	3,33
	B14-24	0,06	0,95	1,21	2,32	2,58	3,16	3,39	4,79E-7	4,79E-7	0,26	0,42	0,83	0,92	3,36E-7	3,36E-7	3,39
	B14-21	0,06	0,94	1,22	2,29	2,50	2,99	3,11	6,80E-7	6,80E-7	0,24	0,41	0,69	0,79	3,16E-7	3,16E-7	3,17
	B14-38	0,06	0,95	1,37	2,41	2,66	3,25	3,51	8,20E-7	8,20E-7	0,31	0,52	0,90	1,00	5,14E-7	5,14E-7	3,61
	B14-22	0,08	0,93	1,16	2,13	2,37	2,86	3,06	9,81E-7	9,81E-7	0,19	0,37	0,67	0,74	5,74E-7	5,74E-7	3,33
	B14-23	0,12	0,92	1,27	2,31	2,56	2,99	3,12	8,56E-7	8,56E-7	0,26	0,44	0,70	0,81	5,51E-7	5,51E-7	3,31
	B14-13	0,10	0,92	1,00	1,95	2,25	2,76	3,10	6,06E-7	6,06E-7	0,20	0,32	0,64	0,83	3,80E-7	3,80E-7	3,21
	B14-35	0,03	0,96	1,24	2,17	2,35	3,04	3,38	4,38E-7	4,38E-7	0,30	0,42	0,99	1,12	3,06E-7	3,06E-7	3,72
	B14-27	0,07	0,95	1,08	1,97	2,26	3,03	3,43	3,74E-7	3,74E-7	0,24	0,38	0,90	1,04	2,70E-7	2,70E-7	3,53
	B14-14	0,10	0,93	1,08	1,88	2,23	2,95	3,24	3,92E-7	3,92E-7	0,23	0,47	0,86	1,02	2,14E-7	2,14E-7	3,27
B14-28	0,09	0,95	1,14	2,09	2,43	3,15	3,48	4,96E-7	4,96E-7	0,23	0,52	0,99	1,14	3,31E-7	3,31E-7	3,34	
B14-18	0,11	0,92	1,18	2,11	2,44	2,95	3,23	1,36E-7	1,36E-7	0,26	0,53	0,92	1,13	1,09E-7	1,09E-7	3,36	

Tabelle A 3.16: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Dehnungsentwicklung (Fortsetzung)

VB	Probe	Ph \ddot{U}	Ph \ddot{U}	ε^M	$\varepsilon_o^{0,0}$	$\varepsilon_o^{I/II}$	$\varepsilon_o^{II/III}$	$\varepsilon_o^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{o,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{o,t}^{II}$	$\varepsilon_U^{0,0}$	$\varepsilon_U^{I/II}$	$\varepsilon_U^{II/III}$	$\varepsilon_U^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{U,t}^{II}$	ε^B
		I/II	II/III	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]
E4	B21-13	0,10	0,92	1,25	2,34	2,66	3,11	3,53	2,66E-7	2,66E-7	0,19	0,42	0,74	0,89	1,92E-7	1,92E-7	3,57
	B21-37	0,07	0,91	1,28	2,49	2,74	3,23	3,53	2,07E-7	2,07E-7	0,22	0,49	0,76	0,89	1,21E-7	1,21E-7	3,62
	B21-40	0,10	0,90	1,30	2,44	2,67	3,06	3,30	2,09E-7	2,09E-7	0,27	0,45	0,72	0,82	1,35E-7	1,35E-7	3,27
	B21-39	0,10	0,93	1,31	2,40	2,67	3,20	3,57	2,75E-7	2,75E-7	0,20	0,42	0,76	0,89	1,79E-7	1,79E-7	3,65
	B21-25	0,10	0,93	1,25	2,44	2,74	3,26	3,53	2,01E-7	2,01E-7	0,26	0,50	0,85	0,97	1,34E-7	1,34E-7	3,57
	B21-27	0,05	0,95	1,25	2,32	2,52	2,93	3,31	1,56E-7	1,56E-7	0,26	0,45	0,74	0,88	1,15E-7	1,15E-7	3,41
	B21-20	0,10	0,90	1,41	2,64	2,92	3,39	3,73	1,58E-6	1,58E-7	0,28	0,62	0,94	1,08	1,12E-6	1,12E-7	3,81
	B21-18	0,27	0,94	1,35	2,51	2,96	3,36	3,53	9,65E-7	9,65E-8	0,33	0,67	0,96	1,06	6,93E-7	6,93E-8	3,60
	B21-14	0,09	0,98	1,37	2,59	2,94	3,61	3,73	7,31E-7	7,31E-8	0,26	0,60	1,08	1,13	5,12E-7	5,12E-8	3,78
	B21-32	0,10	0,94	1,29	2,47	2,85	3,50	3,68	4,09E-7	4,09E-8	0,23	0,59	1,04	1,12	2,87E-7	2,87E-8	3,74
	B21-22	0,10	0,93	1,33	2,58	2,87	3,41	3,64	1,77E-6	1,77E-7	0,22	0,50	0,89	0,99	1,24E-6	1,24E-7	3,79
	B21-23	0,08	0,94	1,26	2,48	2,64	2,97	3,13	1,96E-6	1,96E-7	0,20	0,40	0,62	0,68	1,34E-6	1,34E-7	3,19
	B21-15	0,09	0,94	1,32	2,46	2,76	3,24	3,56	1,62E-7	1,62E-7	0,29	0,50	0,82	0,90	1,07E-7	1,07E-7	3,57
	B21-36	0,10	0,91	1,26	2,34	2,64	3,05	3,35	1,48E-7	1,48E-7	0,32	0,47	0,73	0,87	8,69E-8	8,69E-8	3,35
	B21-33	0,06	0,96	1,36	2,64	2,91	3,42	3,69	1,64E-7	1,64E-7	0,42	0,65	0,92	1,03	7,90E-8	7,90E-8	3,73
	B21-26	0,05	0,96	1,38	2,52	2,80	3,28	3,59	1,19E-7	1,19E-7	0,34	0,56	0,87	0,94	7,60E-8	7,60E-8	3,65
B21-28	0,07	0,92	1,34	2,49	2,77	3,26	3,77	1,05E-7	1,05E-7	0,18	0,46	0,80	1,00	8,08E-8	8,08E-8	3,90	
B21-24	0,07	0,96	1,26	2,38	2,62	3,28	3,64	7,57E-8	7,57E-8	0,22	0,45	0,89	1,03	5,38E-8	5,38E-8	3,76	
B21-7	0,10	0,93	1,36	2,48	2,79	3,21	3,49	6,45E-8	6,45E-8	0,29	0,50	0,81	0,92	4,56E-8	4,56E-8	3,30	

Tabelle A 3.17: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Dehnungsentwicklung (Fortsetzung)

VB	Probe	PhÜ	PhÜ	ε^M	$\varepsilon_o^{0,0}$	$\varepsilon_o^{I/II}$	$\varepsilon_o^{II/III}$	$\varepsilon_o^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{O,t}^{II}$	$\varepsilon_U^{0,0}$	$\varepsilon_U^{I/II}$	$\varepsilon_U^{II/III}$	$\varepsilon_U^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{U,t}^{II}$	ε^B
		I/II	II/III	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]
E4	B21-10	0,09	0,93	1,33	2,34	2,84	3,37	3,55	1,64E-7	1,64E-8	0,24	0,65	1,13	1,29	1,53E-7	1,53E-8	3,64
	B21-31	0,05	0,93	1,37	2,51	2,64	3,04	3,20	2,53E-6	2,53E-7	0,29	0,53	0,82	0,89	1,72E-6	1,72E-7	3,31
	B21-42	0,06	0,94	1,34	2,47	2,71	3,35	3,56	6,78E-7	6,78E-8	0,27	0,55	1,00	1,08	5,08E-7	5,08E-8	3,62
	B21-41	0,08	0,92	1,42	2,63	2,99	3,65	3,93	4,77E-7	4,77E-8	0,35	0,67	1,17	1,27	3,77E-7	3,77E-8	3,94
	B21-35	0,07	0,95	1,30	2,49	2,70	3,12	3,36	6,19E-7	6,19E-8	0,27	0,49	0,68	0,73	2,80E-7	2,80E-8	3,40
	B21-17	0,10	0,94	1,34	2,49	2,91	3,47	3,72	1,80E-7	1,80E-8	0,29	0,69	1,18	1,35	1,62E-7	1,62E-8	3,73
	B21-9	0,30	0,95	1,26	2,39	3,10	3,53	3,79	7,12E-8	7,12E-9	0,19	0,82	1,10	1,26	4,45E-8	4,45E-9	3,82
	B22-38	0,15	0,84	1,45	2,81	2,98	3,26	3,48	4,41E-6	3,92E-6	0,24	0,42	0,55	0,61	2,19E-6	1,95E-6	3,55
	B22-40	0,21	0,90	1,42	2,75	3,06	3,36	3,55	1,57E-6	1,40E-6	0,21	0,44	0,63	0,72	1,01E-6	8,96E-7	3,55
	B22-27	0,13	0,94	1,44	2,74	2,96	3,36	3,48	3,23E-6	2,88E-6	0,27	0,50	0,71	0,75	1,67E-6	1,48E-6	3,54
	B22-15	0,14	0,93	1,49	2,78	2,90	3,11	3,15	5,74E-6	5,11E-6	0,31	0,44	0,59	0,61	4,60E-6	4,09E-6	3,18
	B22-9	0,13	0,98	1,48	2,79	2,95	3,24	3,30	6,23E-6	5,54E-6	0,36	0,52	0,71	0,71	3,88E-6	3,45E-6	3,42
	B22-43	0,11	0,95	1,41	2,78	2,94	3,36	3,47	4,70E-6	4,19E-6	0,25	0,45	0,69	0,72	2,75E-6	2,45E-6	3,55
	B22-32	0,15	0,95	1,49	2,74	2,99	3,24	3,36	1,25E-6	1,11E-6	0,24	0,48	0,66	0,72	7,79E-7	6,94E-7	3,39
B22-24	0,10	0,92	1,46	2,71	2,96	3,31	3,54	1,51E-6	1,34E-6	0,27	0,50	0,74	0,86	9,77E-7	8,70E-7	3,58	

Tabelle A 3.18: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Dehnungsentwicklung (Fortsetzung)

VB	Probe	PhÜ	PhÜ	ε^M	$\varepsilon_o^{0,0}$	$\varepsilon_o^{I/II}$	$\varepsilon_o^{II/III}$	$\varepsilon_o^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{o,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{o,t}^{II}$	$\varepsilon_U^{0,0}$	$\varepsilon_U^{I/II}$	$\varepsilon_U^{II/III}$	$\varepsilon_U^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{U,t}^{II}$	ε^B
		I/II	II/III	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]
E4	B22-34	0,21	0,84	1,40	2,87	3,02	3,31	3,42	2,48E-5	2,20E-6	0,16	0,45	0,59	0,65	1,16E-5	1,03E-6	3,54
	B22-10	0,13	0,92	1,38	2,71	2,95	3,44	3,58	4,87E-6	4,33E-7	0,24	0,51	0,78	0,87	2,42E-6	2,15E-7	3,65
	B22-37	0,17	0,90	1,44	2,80	3,07	3,44	3,58	5,80E-6	5,16E-7	0,24	0,50	0,71	0,78	3,08E-6	2,74E-7	3,67
	B22-19	0,18	0,95	1,39	2,72	2,94	3,26	3,32	9,58E-6	8,52E-7	0,19	0,45	0,64	0,68	5,95E-6	5,30E-7	3,29
	B22-31	0,13	0,91	1,37	2,67	2,91	3,35	3,54	3,94E-6	3,51E-7	0,21	0,48	0,76	0,82	2,24E-6	2,00E-7	3,62
	B22-23	0,13	0,91	1,43	2,75	2,95	3,43	3,58	5,13E-6	4,57E-7	0,28	0,52	0,82	0,89	3,24E-6	2,88E-7	3,65
	B22-14	0,14	0,91	1,41	2,73	2,92	3,27	3,45	6,46E-6	5,75E-7	0,21	0,47	0,70	0,74	4,74E-6	4,22E-7	3,60
	B22-28	0,13	0,90	1,44	2,77	3,00	3,34	3,57	3,18E-6	2,83E-6	0,32	0,48	0,65	0,72	1,43E-6	1,27E-6	3,59
	B22-8	0,11	0,93	1,46	2,74	3,01	3,46	3,72	1,38E-6	1,23E-6	0,35	0,54	0,78	0,87	7,20E-7	6,41E-7	3,72
	B22-11	0,11	0,91	1,44	2,71	3,00	3,37	3,55	1,41E-6	1,26E-6	0,33	0,55	0,76	0,86	8,94E-7	7,96E-7	3,68
	B22-35	0,14	0,87	1,50	2,69	2,98	3,29	3,52	5,66E-7	5,04E-7	0,36	0,59	0,77	0,86	3,26E-7	2,90E-7	3,53
	B22-41	0,13	0,96	1,42	2,77	3,04	3,41	3,61	1,11E-6	9,87E-7	0,32	0,49	0,71	0,77	6,34E-7	5,65E-7	3,66
	B22-7	0,16	0,88	1,32	2,49	2,82	3,11	3,28	6,08E-7	5,41E-7	0,21	0,45	0,60	0,68	3,19E-7	2,84E-7	3,16
	B22-20	0,11	0,95	1,59	2,91	3,09	3,53	3,64	4,96E-6	4,41E-7	0,30	0,52	0,83	0,89	3,58E-6	3,18E-7	3,65
	B22-26	0,07	0,93	1,48	2,80	3,03	3,57	3,88	2,28E-6	2,03E-7	0,28	0,50	0,86	0,92	1,57E-6	1,40E-7	3,90
	B22-30	0,15	0,88	1,25	2,50	2,79	3,15	3,40	2,32E-6	2,07E-7	0,13	0,37	0,62	0,71	1,73E-6	1,54E-7	3,43
B22-42	0,11	0,91	1,44	2,83	3,04	3,48	3,58	3,57E-6	3,18E-7	0,33	0,53	0,81	0,88	2,42E-6	2,15E-7	3,54	
B22-33	0,10	0,94	1,50	2,88	3,13	3,67	3,80	3,14E-6	2,80E-7	0,24	0,53	0,90	0,99	1,96E-6	1,75E-7	3,86	
B22-21	0,10	0,92	1,44	2,75	2,97	3,41	3,60	2,02E-6	1,80E-7	0,33	0,55	0,83	0,92	1,28E-6	1,14E-7	3,77	

Tabelle A 3.19: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Dehnungsentwicklung (Fortsetzung)

VB	Probe	PhÜ	PhÜ	ε^M	$\varepsilon_o^{0,0}$	$\varepsilon_o^{I/II}$	$\varepsilon_o^{II/III}$	$\varepsilon_o^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{o,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{o,t}^{II}$	$\varepsilon_U^{0,0}$	$\varepsilon_U^{I/II}$	$\varepsilon_U^{II/III}$	$\varepsilon_U^{1,0}$	$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	$\bar{\varepsilon}_{U,t}^{II}$	ε^B
		I/II	II/III	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[-]	[s ⁻¹]	[‰]
E4	B23-14	0,13	0,93	1,48	2,86	3,17	3,51	3,63	1,30E-6	1,12E-6	0,31	0,53	0,71	0,75	8,01E-7	6,89E-7	3,55
	B23-19	0,14	0,93	1,51	2,80	3,03	3,40	3,67	2,11E-6	1,82E-6	0,27	0,50	0,65	0,69	6,92E-7	5,95E-7	3,83
	B23-33	0,13	0,92	1,54	2,89	3,11	3,51	3,77	1,44E-6	1,24E-6	0,26	0,48	0,71	0,80	8,01E-7	6,89E-7	3,82
	B23-22	0,11	0,97	1,45	2,79	3,11	3,49	3,71	1,00E-6	8,65E-7	0,30	0,55	0,78	0,80	6,34E-7	5,46E-7	3,85
	B23-12	0,09	0,94	1,49	2,90	3,12	3,54	3,68	1,41E-6	1,21E-6	0,26	0,48	0,71	0,77	7,93E-7	6,83E-7	3,70
	B23-25	0,06	0,92	1,53	2,90	3,07	3,44	3,62	1,25E-6	1,08E-6	0,32	0,45	0,66	0,73	6,79E-7	5,85E-7	3,66
	B23-15	0,09	0,94	1,45	2,61	2,96	3,58	3,96	1,55E-7	1,51E-7	0,39	0,60	1,08	1,27	1,15E-7	1,12E-7	3,97
	B23-42	0,10	0,92	1,41	2,54	2,85	3,25	3,50	1,10E-7	1,07E-7	0,30	0,55	0,88	1,00	9,53E-8	9,30E-8	3,55
	B23-30	0,15	0,92	1,30	2,37	2,73	3,04	3,23	1,17E-7	1,14E-7	0,29	0,48	0,67	0,77	7,93E-8	7,74E-8	3,28
	B23-40	0,12	0,94	1,30	2,42	2,78	3,33	3,59	1,67E-7	1,63E-7	0,30	0,55	0,86	0,99	9,66E-8	9,42E-8	3,56
	B23-9	0,12	0,97	1,39	2,59	2,92	3,32	3,82	8,12E-8	7,92E-8	0,28	0,50	0,81	0,96	6,72E-8	6,56E-8	3,99
	B23-31	0,10	0,93	1,49	2,63	3,00	3,46	3,77	1,25E-7	1,22E-7	0,36	0,58	0,89	1,04	7,49E-8	7,31E-8	3,88
	B23-8	0,05	0,95	1,49	2,52	2,85	3,36	3,76	5,67E-8	5,53E-7	0,53	0,55	0,78	1,02	2,51E-8	2,45E-7	3,76
	B23-24	0,05	0,95	1,32	2,34	2,64	2,96	3,35	3,44E-8	3,36E-7	0,39	0,40	0,58	0,74	1,96E-8	1,91E-7	3,49
	B23-39	0,05	0,91	1,36	2,31	2,63	3,06	3,56	6,28E-8	6,12E-7	0,40	0,42	0,64	0,87	3,40E-8	3,32E-7	3,65
B23-32	0,04	0,94	1,41	2,48	2,74	3,23	3,55	5,68E-8	5,54E-7	0,49	0,43	0,68	0,81	2,90E-8	2,83E-7	3,49	
B23-37	0,07	0,94	1,30	2,29	2,66	3,10	3,54	7,60E-8	7,41E-7	0,37	0,33	0,53	0,71	3,28E-8	3,20E-7	3,58	

Tabelle A 3.20: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Dehnungsentwicklung (Fortsetzung)

VB	Probe	$E_s^{0,0}$	$E_s^{I/II}$	$E_s^{II/III}$	$E_s^{1,0}$	$\Delta E_s^{0,0-1,0}$	$\Delta E_s^{I/II-III}$	$ \bar{E}_{s,N}^{II} $	$ \bar{E}_{s,t}^{II} $
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ² ·s ⁻¹]
E2	B12-33	44361	41112	37993	36064	18,7	7,0	1,1	1,1
	B12-8	45139	41819	40417	38896	13,8	3,1	0,4	0,4
	B12-24	45644	43752	39601	37515	17,8	9,1	1,8	1,8
	B12-16	44392	43026	39993	38684	12,9	6,8	0,6	0,6
	B12-34	43380	40084	34894	32816	24,4	12,0	1,4	1,4
	B12-14	38599	37861	36309	36038	6,6	4,0	104,7	10,5
	B12-30	38759	37471	35055	34583	10,8	6,2	77,0	7,7
	B12-19	41419	39871	36719	36170	12,7	7,6	159,0	15,9
	B12-18	39752	38908	36543	36543	8,1	5,9	230,9	23,1
	B12-9	39192	38387	36202	35940	8,3	5,6	57,0	5,7
	B12-36	40918	39631	37842	39195	4,2	4,4	80,4	8,0
	B12-31	41984	40155	37206	36423	13,3	7,0	21,3	2,1
	B12-25	41073	39024	36500	35565	13,4	6,1	24,5	2,5
	B12-21	38307	36560	33535	32396	15,4	7,9	20,5	2,0
	B12-10	41166	39318	36809	34324	16,6	6,1	54,8	5,5
	B12-27	37886	37232	34386	34164	9,8	7,5	49,0	4,9
B12-26	38543	36411	33015	32522	15,6	8,8	44,6	4,5	

Tabelle A 3.21: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Steifigkeitsentwicklung

VB	Probe	$E_s^{0,0}$	$E_s^{I/II}$	$E_s^{II/III}$	$E_s^{1,0}$	$\Delta E_s^{0,0-1,0}$	$\Delta E_s^{I/II-III}$	$ \bar{E}_{s,N}^{II} $	$ \bar{E}_{s,t}^{II} $
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ² ·s ⁻¹]
E2	B12-20	39213	37764	34060	32415	17,3	9,4	5,0	0,5
	B12-12	38833	36303	33406	32044	17,5	7,5	3,2	0,3
	B12-35	40151	36119	33658	32582	18,9	6,1	1,9	0,2
	B12-13	39610	36765	34356	33871	14,5	6,1	3,5	0,3
	B12-15	41557	37957	34309	32962	20,7	8,8	11,0	1,1
	B12-28	41348	37913	36418	34200	17,3	3,6	1,2	0,1
	B12-29	39556	35360	33563	31776	19,7	4,5	2,1	0,2
	B13-26	44583	39380	37000	33040	25,9	5,3	0,6	5,8
	B13-32	48111	43921	39015	36044	25,1	10,2	1,5	14,6
	B13-12	47223	42872	37732	32743	30,7	10,9	1,0	9,9
	B13-29	42225	41968	38814	33644	20,3	7,5	0,6	5,5
	B13-22	42995	43071	39177	32941	23,4	9,1	0,5	4,8
	B13-27	45786	45741	42055	33805	26,2	8,1	0,7	6,7
	B13-21	46181	42473	38288	36638	20,7	9,1	2,4	2,4
	B13-24	47540	43275	40402	37720	20,7	6,0	1,1	1,1
	B13-8	42717	40979	37701	34331	19,6	7,7	3,4	3,4
	B13-31	47082	42134	39193	36197	23,1	6,2	1,3	1,3
	B13-15	45356	41261	36404	33753	25,6	10,7	3,5	3,5
B13-10	42513	39863	38092	36006	15,3	4,2	1,1	1,1	

Tabelle A 3.22: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Steifigkeitsentwicklung (Fortsetzung)

VB	Probe	$E_s^{0,0}$	$E_s^{I/II}$	$E_s^{II/III}$	$E_s^{1,0}$	$\Delta E_s^{0,0-1,0}$	$\Delta E_s^{I/II-III}$	$ \bar{E}_{s,N}^{II} $	$ \bar{E}_{s,t}^{II} $
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ² ·s ⁻¹]
E2	B14-37	44122	42433	40506	38441	12,9	4,4	11,1	11,1
	B14-33	45385	43255	39536	37244	17,9	8,2	28,2	28,2
	B14-32	42390	41537	38965	38354	9,5	6,1	23,6	23,6
	B14-20	45785	43340	40989	40724	11,1	5,1	10,9	10,9
	B14-36	42700	40732	38922	37547	12,1	4,2	10,4	10,4
	B14-17	43636	42131	39431	36997	15,2	6,2	24,3	24,3
	B14-24	43062	40692	37678	35458	17,7	7,0	2,5	2,5
	B14-21	43292	41967	37943	37776	12,7	9,3	6,6	6,6
	B14-38	43553	41104	37294	35972	17,4	8,7	5,5	5,5
	B14-22	45910	44040	40100	38009	17,2	8,6	8,1	8,1
	B14-23	43004	41378	38368	37853	12,0	7,0	5,7	5,7
	B14-13	43940	40443	36574	34306	21,9	8,8	4,2	4,2
	B14-35	41328	40194	37843	35227	14,8	5,7	2,6	2,6
	B14-27	45661	41334	36526	33440	26,8	10,5	2,1	2,1
	B14-14	47953	44112	37001	35344	26,3	14,8	3,7	3,7
	B14-28	43527	40666	35990	33169	23,8	10,7	3,1	3,1
B14-18	42515	40564	38159	36925	13,2	5,7	0,5	0,5	

Tabelle A 3.23: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Steifigkeitsentwicklung (Fortsetzung)

VB	Probe	$E_s^{0,0}$	$E_s^{I/II}$	$E_s^{II/III}$	$E_s^{1,0}$	$\Delta E_s^{0,0-1,0}$	$\Delta E_s^{I/II-III}$	$ \bar{E}_{s,N}^{II} $	$ \bar{E}_{s,t}^{II} $
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ² ·s ⁻¹]
E4	B21-13	40031	36790	34767	31035	22,5	5,1	1,1	1,1
	B21-37	37813	36639	33407	31217	17,4	8,5	1,3	1,3
	B21-40	39036	36962	35110	33185	15,0	4,7	1,2	1,2
	B21-39	38295	36458	33709	31329	18,2	7,2	1,4	1,4
	B21-25	38920	36733	34278	32147	17,4	6,3	1,0	1,0
	B21-27	41557	39657	37571	34876	16,1	5,0	0,8	0,8
	B21-20	37141	35592	33439	31982	13,9	5,8	6,7	0,7
	B21-18	38901	35732	34148	33128	14,8	4,1	4,1	0,4
	B21-14	36737	34845	32387	31376	14,6	6,7	3,0	0,3
	B21-32	37688	36177	33064	32291	14,3	8,3	1,8	0,2
	B21-22	36027	34609	32587	31773	11,8	5,6	7,4	0,7
	B21-23	37644	36594	34846	34423	8,6	4,6	9,7	1,0
	B21-15	38119	36274	33592	31273	18,0	7,0	0,8	0,8
	B21-36	41185	37568	35185	33318	19,1	5,8	1,0	1,0
	B21-33	37369	36237	32680	30710	17,8	9,5	1,2	1,2
	B21-26	38495	36592	33894	30807	20,0	7,0	0,7	0,7
	B21-28	36166	35088	33112	30546	15,5	5,5	0,3	0,3
B21-24	38483	37543	34263	31921	17,1	8,5	0,3	0,3	
B21-7	38218	35783	34149	32136	15,9	4,3	0,3	0,3	

Tabelle A 3.24: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Steifigkeitsentwicklung (Fortsetzung)

VB	Probe	$E_s^{0,0}$	$E_s^{I/II}$	$E_s^{II/III}$	$E_s^{1,0}$	$\Delta E_s^{0,0-1,0}$	$\Delta E_s^{I/II-II/III}$	$ \bar{E}_{s,N}^{II} $	$ \bar{E}_{s,t}^{II} $
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ² ·s ⁻¹]
E4	B21-10	41441	37221	36390	35986	13,2	2,0	0,2	0,0
	B21-31	40113	38963	36984	36009	10,2	4,9	14,8	1,5
	B21-42	39110	37681	34959	33155	15,2	7,0	2,7	0,3
	B21-41	38004	35161	32996	30625	19,4	5,7	1,4	0,1
	B21-35	38423	36942	33339	31650	17,6	9,4	5,1	0,5
	B21-17	38002	36709	35462	35067	7,7	3,3	0,3	0,0
	B21-9	38301	35865	33618	32735	14,5	5,9	0,4	0,0
	B22-38	37701	36055	34060	32730	13,2	5,3	29,0	25,8
	B22-40	37529	35068	33707	32473	13,5	3,6	7,2	6,4
	B22-27	38396	37327	34657	33571	12,6	7,0	22,6	20,1
	B22-15	38474	37551	36639	36226	5,8	2,4	15,3	13,6
	B22-9	39528	37804	36324	36324	8,1	3,7	34,6	30,8
	B22-43	37955	36846	34574	34129	10,1	6,0	27,6	24,5
	B22-32	38219	36712	35700	34869	8,8	2,6	6,5	5,8
B22-24	39695	37651	35995	34465	13,2	4,2	7,9	7,0	

Tabelle A 3.25: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Steifigkeitsentwicklung (Fortsetzung)

VB	Probe	$E_s^{0,0}$	$E_s^{I/II}$	$E_s^{II/III}$	$E_s^{1,0}$	$\Delta E_s^{0,0-1,0}$	$\Delta E_s^{I/II-III}$	$ \bar{E}_{s,N}^{II} $	$ \bar{E}_{s,t}^{II} $
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ² ·s ⁻¹]
E4	B22-34	36983	36200	33717	33124	10,4	6,7	189,1	16,8
	B22-10	40164	37550	34527	33804	15,8	7,5	34,8	3,1
	B22-37	37563	35774	33678	32796	12,7	5,6	35,5	3,2
	B22-19	38140	36973	35034	34620	9,2	5,1	52,8	4,7
	B22-31	39452	37788	35492	34481	12,6	5,8	24,9	2,2
	B22-23	39119	37829	35230	34114	12,8	6,6	27,6	2,5
	B22-14	39096	37469	35655	34673	11,3	4,6	25,9	2,3
	B22-28	38194	36258	34229	32905	13,9	5,3	23,4	20,8
	B22-8	39355	37165	34225	32782	16,7	7,5	9,0	8,0
	B22-11	40307	37650	35391	34314	14,9	5,6	7,5	6,7
	B22-35	40216	38423	36287	34454	14,3	5,3	3,7	3,3
	B22-41	38644	36100	33870	32729	15,3	5,8	6,4	5,7
	B22-7	41229	38510	36386	35206	14,6	5,2	4,5	4,0
	B22-20	36830	35805	34097	34005	7,7	4,6	18,6	1,7
	B22-26	37477	36073	33735	32948	12,1	6,2	9,4	0,8
	B22-30	39738	37920	36197	34388	13,5	4,3	9,0	0,8
	B22-42	38481	36474	34403	34185	11,2	5,4	15,9	1,4
B22-33	36097	35296	33063	32558	9,8	6,2	15,2	1,3	
B22-21	39235	37864	35516	35297	10,0	6,0	11,0	1,0	

Tabelle A 3.26: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Steifigkeitsentwicklung (Fortsetzung)

VB	Probe	$E_s^{0,0}$	$E_s^{I/II}$	$E_s^{II/III}$	$E_s^{1,0}$	$\Delta E_s^{0,0-1,0}$	$\Delta E_s^{I/II-III}$	$ \bar{E}_{s,N}^{II} $	$ \bar{E}_{s,t}^{II} $
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ² ·s ⁻¹]
E4	B23-14	38178	35786	33866	33167	13,1	5,0	6,2	5,3
	B23-19	38759	37633	34470	32791	15,4	8,2	19,2	16,6
	B23-33	37097	36249	33798	32713	11,8	6,6	8,3	7,2
	B23-22	39823	37059	34999	33976	14,7	5,2	5,1	4,4
	B23-12	37112	35960	33521	32800	11,6	6,6	7,8	6,7
	B23-25	37440	36207	34181	33237	11,2	5,4	7,6	6,5
	B23-15	38373	35602	33685	32175	16,2	5,0	0,6	0,6
	B23-42	38116	36236	35315	33468	12,2	2,4	0,2	0,2
	B23-30	40468	37074	35125	33781	16,5	4,8	0,6	0,6
	B23-40	39713	37382	33752	32544	18,1	9,1	1,1	1,0
	B23-9	36653	34687	33275	30512	16,8	3,9	0,2	0,2
	B23-31	37691	34591	32451	30576	18,9	5,7	0,7	0,6
	B23-8	38143	36486	32509	29710	22,1	10,4	0,4	4,4
	B23-24	39660	37090	35133	33107	16,5	4,9	0,2	2,3
	B23-39	40454	37941	34588	31826	21,3	8,3	0,4	4,3
	B23-32	38462	36185	32867	30881	19,7	8,6	0,4	3,9
B23-37	39704	36038	32538	29799	25,0	8,8	0,6	5,9	

Tabelle A 3.27: Zusammenstellung der grundlegenden Kenngrößen der Steifigkeitsentwicklung (Fortsetzung)

A-3.2.2 Einfluss der bezogenen Oberspannung

				A	B	C	D	E	
Wechsel der bezogenen Oberspannung S_0 [-]				0,95 ↓ 0,90	0,90 ↓ 0,80	0,95 ↓ 0,90	0,90 ↓ 0,80	0,90 ↓ 0,80	
Frequenz f_p [Hz]				0,1		1,0		0,86 /0,98	
Wellenform				Sinus				Dreieck	
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]				-	-	-	-	445,3	
Charge				B12		B14		B23	
1	Absolute Werte der Kenngrößenänderung	Oberdehnung	$\Delta\varepsilon_O^I$	[‰]	0,10	0,19	0,02	0,06	0,10
2			$\Delta\varepsilon_O^{II}$	[‰]	0,13	0,10	0,13	0,14	0,08
3			$\Delta\varepsilon_O^{III}$	[‰]	0,08	0,03	0,01	0,14	0,12
4			$\Delta\varepsilon_O^{0,0-1,0}$	[‰]	0,32	0,31	0,16	0,34	0,30
5			$\bar{\varepsilon}_{O,N}^I$	[-]	-2,00E-5	-1,71E-5	-8,64E-6	-2,07E-6	-6,65E-6
6			$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{II}$	[-]	-1,51E-5	-5,82E-6	-2,00E-6	-3,56E-7	-1,29E-6
7			$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{III}$	[-]	-2,14E-5	-2,64E-5	-1,95E-5	-8,34E-7	-1,00E-5
8			$\varepsilon_O^{1,0}$	[‰]	0,19	-0,12	0,03	0,07	-0,04
9		Unterdehnung	$\Delta\varepsilon_U^I$	[‰]	0,07	0,07	0,01	0,02	0,01
10			$\Delta\varepsilon_U^{II}$	[‰]	0,08	0,13	0,08	0,12	0,12
11			$\Delta\varepsilon_U^{III}$	[‰]	0,03	0,03	0,03	0,07	0,09
12			$\Delta\varepsilon_U^{0,0-1,0}$	[‰]	0,18	0,22	0,12	0,20	0,21
13			$\bar{\varepsilon}_{U,N}^I$	[-]	-3,35E-5	-2,13E-5	-7,35E-6	-1,97E-6	-5,97E-6
14			$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	[-]	-9,64E-6	-3,49E-6	-1,28E-6	-1,90E-7	-6,45E-7
15			$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{III}$	[-]	-1,07E-5	-7,93E-6	-6,52E-6	-5,21E-7	-2,02E-6
16			$\varepsilon_U^{1,0}$	[‰]	0,20	0,15	0,11	0,20	0,25
17		ε^B	[‰]	0,16	-0,09	0,03	0,04	-0,03	
18		$\Delta\bar{\varepsilon}_N^{II}$	[-]	-5,51E-6	-2,34E-6	-7,21E-7	-1,67E-7	-6,48E-7	

Tabelle A 3.28: Absolute Änderung der Dehnungs-Kenngrößen: Einfluss der bezogenen Oberspannung

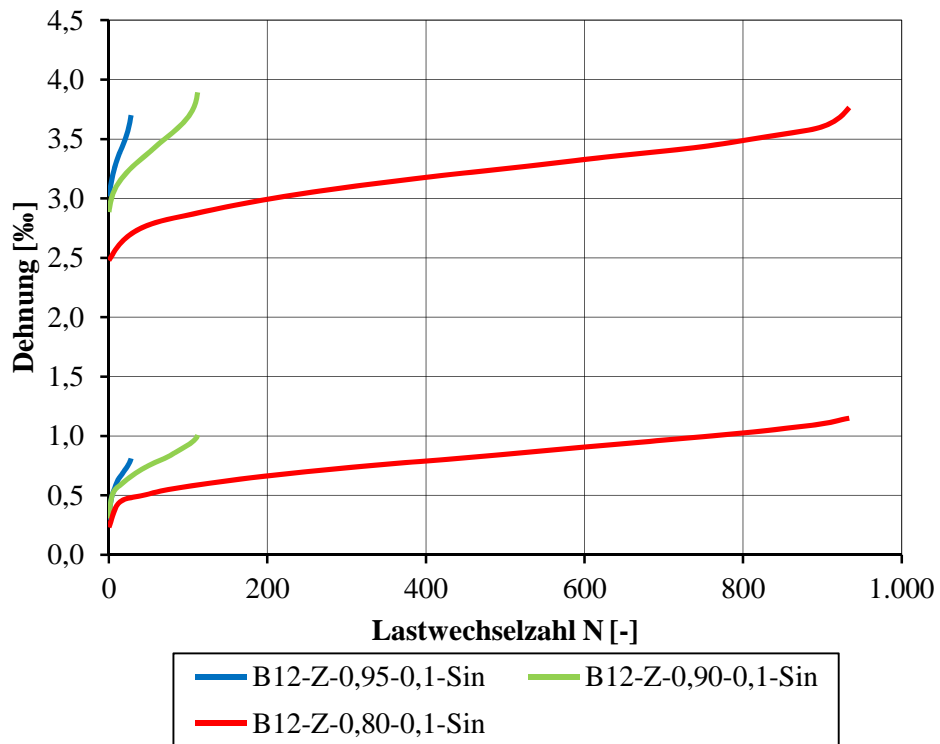


Abbildung A 3.1: Gemittelte Dehnungsentwicklungen: Einfluss der bezogenen Oberspannung (B12)

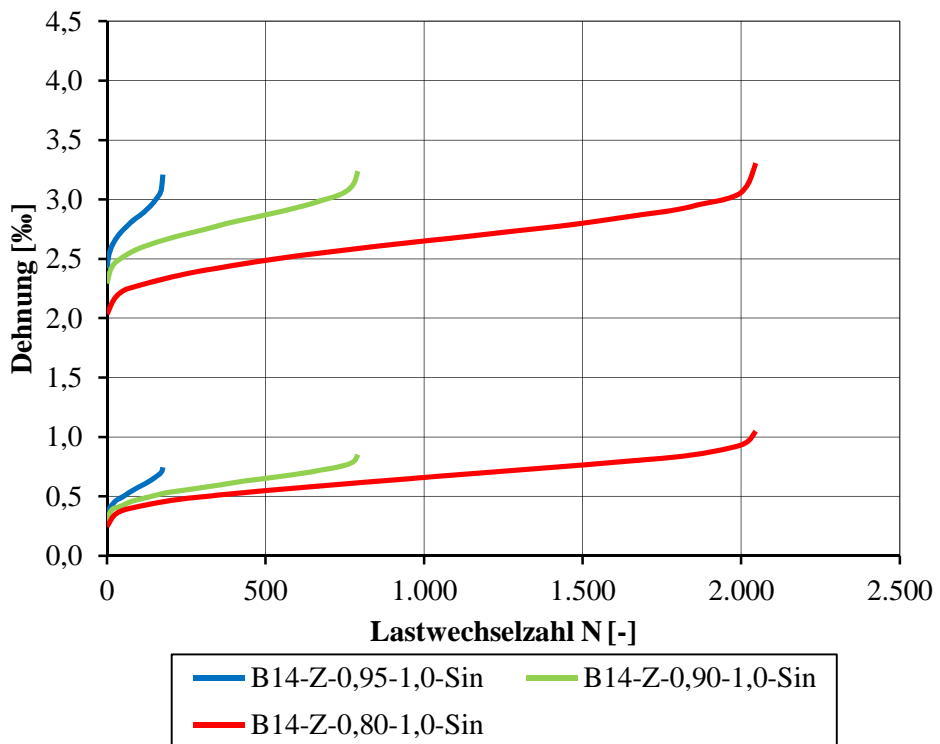


Abbildung A 3.2: Gemittelte Dehnungsentwicklungen: Einfluss der bezogenen Oberspannung (B14)

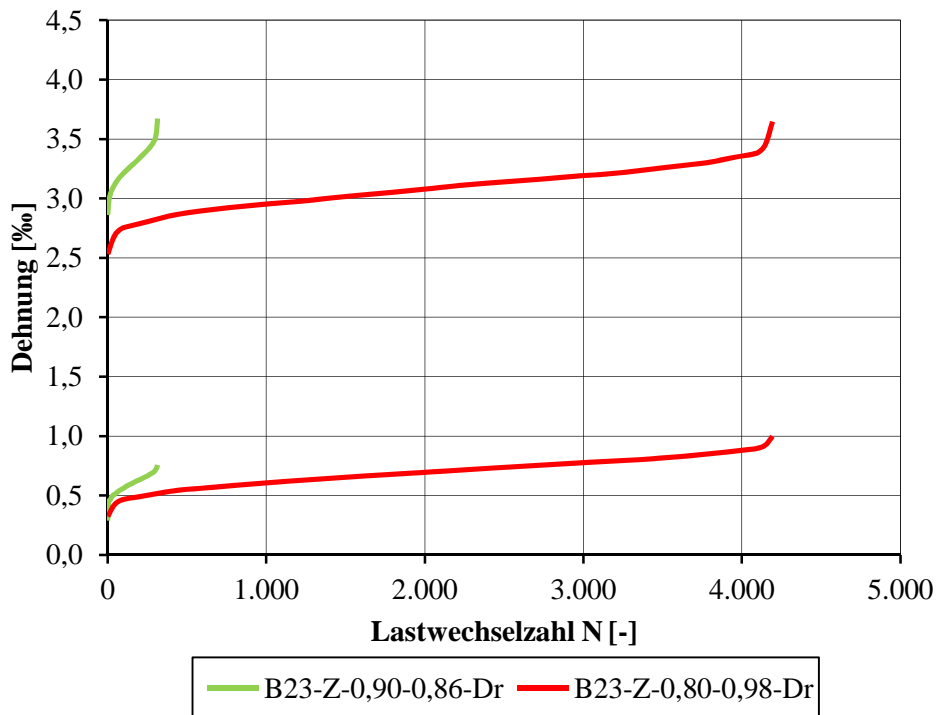


Abbildung A 3.3: Gemittelte Dehnungsentwicklungen: Einfluss der bezogenen Oberspannung (B23)

				A	B	C	D	E
Wechsel der bezogenen Oberspannung S_o [-]				0,95 ↓ 0,90	0,90 ↓ 0,80	0,95 ↓ 0,90	0,90 ↓ 0,80	0,90 ↓ 0,80
Frequenz f_p [Hz]				0,1		1,0		0,86 / 0,98
Wellenform				Sinus				Dreieck
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]				-	-	-	-	445,3
Charge				B12		B14		B23
1	Abs.	$\Delta E_S^{0,0-1,0}$	[N/mm ²]	5,6	3,9	2,3	5,7	3,5
2	Änd.	$\bar{E}_{S,N}^{II}$	[N/mm ²]	-82,4	-31,8	-12,4	-3,0	-8,5

Tabelle A 3.29: Absolute Änderung der Steifigkeits-Kenngrößen: Einfluss der bezogenen Oberspannung

A-3.2.3 Einfluss der Belastungsfrequenz

				A	B	C	D	
Wechsel der Belastungsfrequenz f_p [Hz]				1,0 ↑ 0,1	1,0 ↑ 0,1	10,0 ↑ 1,0	0,89 ↑ 0,09	
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]				-	-	-	-	
Wellenform				Sinus				
Bezogene Oberspannung S_O [-]				0,80	0,80	0,80	0,90	
Charge				B12	B21	B13	B22	
1	Absolute Werte der Kenngrößenänderung	Oberdehnung	$\Delta\varepsilon_{O,0:M}^{0,0}$	[%o]	-0,19	-0,08	-0,02	-0,04
2			$\Delta\varepsilon_{O,0}^I$	[%o]	-0,15	-0,06	-0,10	-0,01
3			$\Delta\varepsilon_{O,0}^{II}$	[%o]	-0,14	-0,04	-0,03	-0,08
4			$\Delta\varepsilon_{O,0}^{III}$	[%o]	0,08	0,13	0,19	0,00
5			$\Delta\varepsilon_{O,0}^{0,0-1,0}$	[%o]	-0,21	0,03	0,05	-0,09
6			$\bar{\varepsilon}_{O,N}^I$	[-]	-2,96E-6	-4,95E-6	-9,39E-7	-8,13E-6
7			$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{II}$	[-]	-7,58E-7	-1,02E-6	-2,30E-7	-5,07E-6
8			$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{III}$	[-]	-2,29E-6	-5,65E-6	-1,58E-6	-2,08E-6
9			$\varepsilon_{O,0}^{1,0}$	[%o]	-0,45	-0,11	0,03	-0,08
10			$\Delta\varepsilon_{O,0}^{1,0:M}$	[%o]	-0,39	-0,05	0,04	-0,13
11		Unterdehnung	$\Delta\varepsilon_{U,0:M}^{0,0}$	[%o]	-0,09	-0,04	-0,01	0,00
12			$\Delta\varepsilon_{U,0}^I$	[%o]	-0,15	-0,09	-0,07	-0,07
13			$\Delta\varepsilon_{U,0}^{II}$	[%o]	-0,14	-0,05	-0,06	-0,04
14			$\Delta\varepsilon_{U,0}^{III}$	[%o]	0,06	0,04	0,08	-0,01
15			$\Delta\varepsilon_{U,0}^{0,0-1,0}$	[%o]	-0,24	-0,10	-0,04	-0,11
16			$\bar{\varepsilon}_{U,N}^I$	[-]	-2,52E-6	-5,59E-6	-6,74E-7	-1,51E-5
17			$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	[-]	-5,45E-7	-7,19E-7	-1,62E-7	-2,51E-6
18			$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{III}$	[-]	-8,37E-7	-2,51E-6	-6,47E-7	-5,61E-6
19			$\varepsilon_{U,0}^{1,0}$	[%o]	-0,20	-0,12	-0,03	-0,06
20			$\Delta\varepsilon_{U,0}^{1,0:M}$	[%o]	0,15	0,06	0,02	0,12
21			ε^B	[%o]	-0,36	-0,14	-0,02	-0,10
22			$\Delta\varepsilon^{B:M}$	[%o]	-0,31	-0,08	-0,02	-0,16
23			$\Delta\bar{\varepsilon}_N^{II}$	[-]	-2,13E-7	-2,97E-7	-6,78E-8	-2,55E-6

Tabelle A 3.30: Absolute Änderung der Dehnungs-Kenngrößen: Einfluss der Belastungsfrequenz (Sinus)

				A	B	C	
Wechsel der Belastungsfrequenz f_p [Hz]				1,0 ↑ 0,1	0,89 ↑ 0,09	9,76 ↑ 0,98	
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]				44,53/ 445,3	44,53/ 445,3	445,3/ 4453	
Wellenform				Dreieck			
Bezogene Oberspannung S_O [-]				0,80	0,90	0,80	
Charge				B21	B22	B23	
1	Absolute Werte der Kenngrößenänderung	Oberdehnung	$\Delta\varepsilon_O^{0,0;M}$	[‰]	0,01	-0,07	-0,13
2			$\Delta\varepsilon_O^I$	[‰]	-0,08	0,05	-0,03
3			$\Delta\varepsilon_O^{II}$	[‰]	-0,02	-0,11	-0,02
4			$\Delta\varepsilon_O^{III}$	[‰]	0,11	0,03	0,10
5			$\Delta\varepsilon_O^{0,0-1,0}$	[‰]	0,00	-0,02	0,04
6			$\bar{\varepsilon}_{O,N}^I$	[-]	-3,39E-6	-5,81E-6	2,64E-8
7			$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{II}$	[-]	-5,55E-7	-1,67E-6	-6,84E-8
8			$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{III}$	[-]	-2,93E-6	-4,35E-6	-4,76E-7
9			$\varepsilon_O^{1,0}$	[‰]	0,00	-0,11	-0,09
10			$\Delta\varepsilon_O^{1,0;M}$	[‰]	0,01	-0,09	-0,08
11		Unterdehnung	$\Delta\varepsilon_U^{0,0;M}$	[‰]	-0,04	-0,06	-0,12
12			$\Delta\varepsilon_U^I$	[‰]	-0,14	-0,03	-0,23
13			$\Delta\varepsilon_U^{II}$	[‰]	-0,06	-0,11	-0,11
14			$\Delta\varepsilon_U^{III}$	[‰]	0,01	0,00	0,05
15			$\Delta\varepsilon_U^{0,0-1,0}$	[‰]	-0,19	-0,14	-0,29
16			$\bar{\varepsilon}_{U,N}^I$	[-]	-5,61E-6	-8,35E-6	-5,06E-7
17			$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$	[-]	-3,88E-7	-1,37E-6	-5,99E-8
18			$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{III}$	[-]	-1,21E-6	-2,97E-6	-1,56E-7
19			$\varepsilon_U^{1,0}$	[‰]	-0,17	-0,09	-0,17
20			$\Delta\varepsilon_U^{1,0;M}$	[‰]	0,16	0,08	0,16
21			ε^B	[‰]	-0,03	-0,13	-0,11
22			$\Delta\varepsilon^{B;M}$	[‰]	-0,01	-0,11	-0,10
23			$\Delta\bar{\varepsilon}_N^{II}$	[-]	-1,67E-7	-3,04E-7	-8,45E-9

Tabelle A 3.31: Absolute Änderung der Dehnungs-Kenngrößen: Einfluss der Belastungsfrequenz (Dreieck)

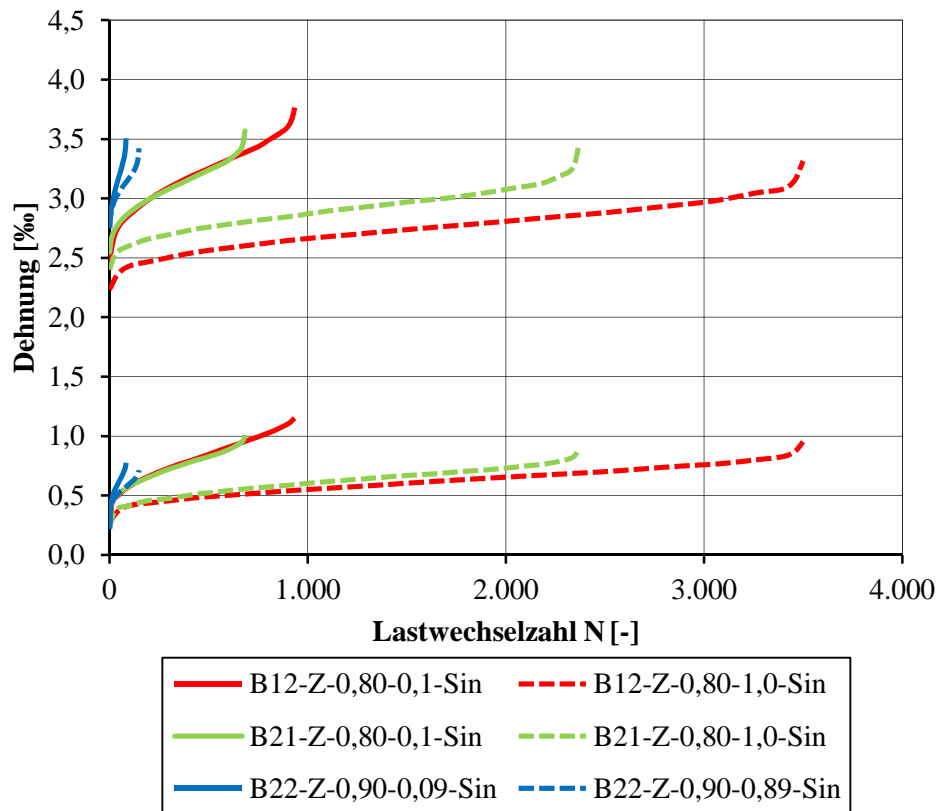


Abbildung A 3.4: Gemittelte Dehnungsentwicklungen: Einfluss der Belastungsfrequenz Sinus (B12; B21; B22)

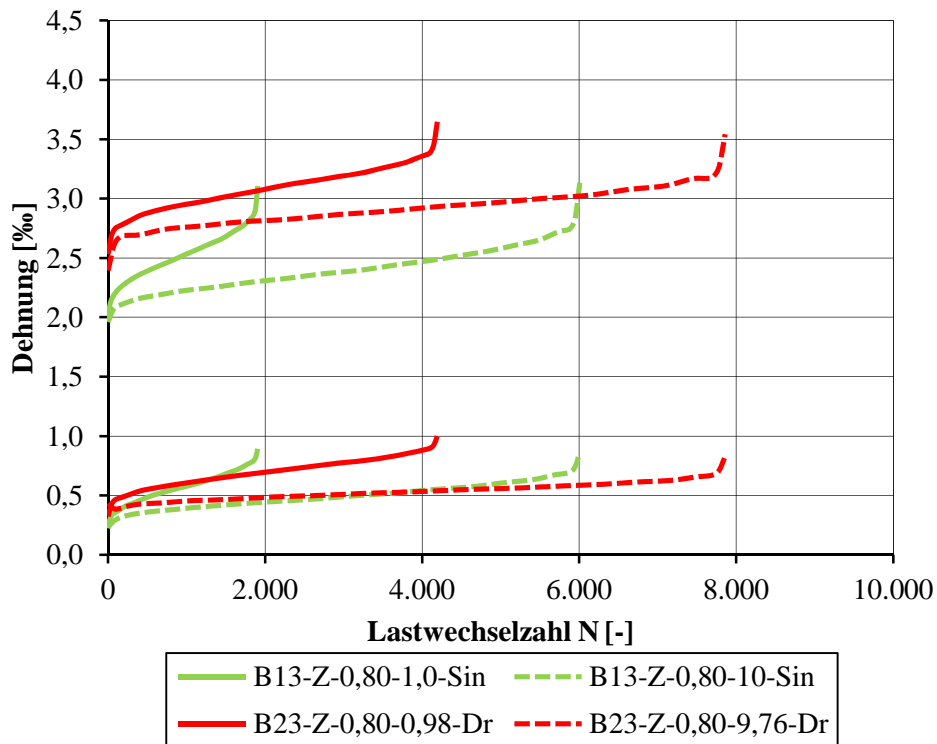


Abbildung A 3.5: Gemittelte Dehnungsentwicklungen: Einfluss der Belastungsfrequenz Sinus und Dreieck (B13; B23)

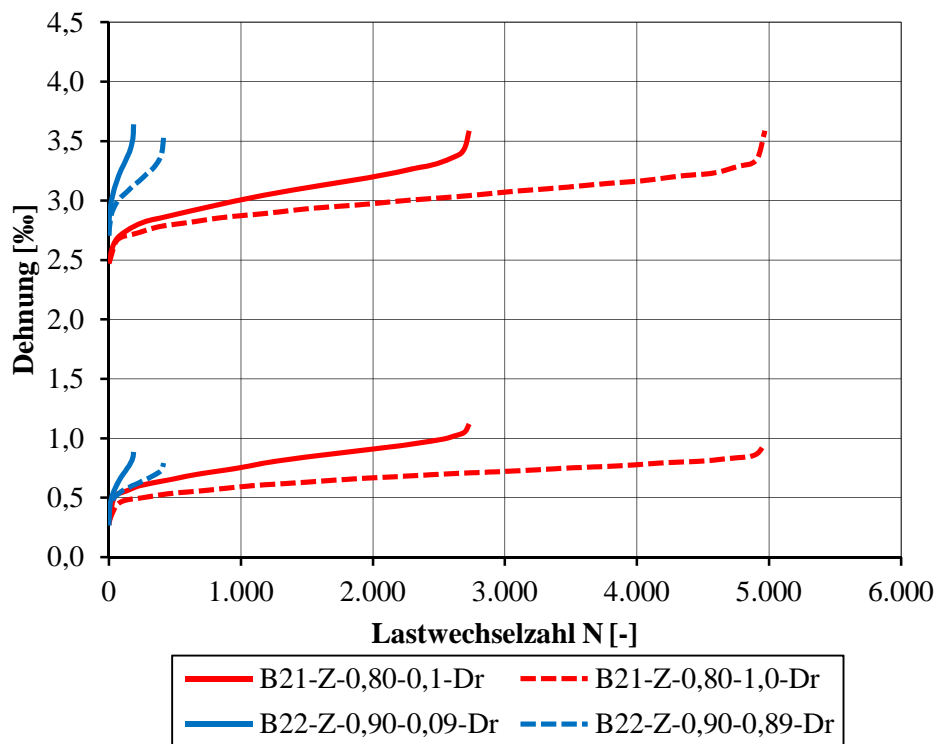


Abbildung A 3.6: Gemittelte Dehnungsentwicklungen: Einfluss der Belastungsfrequenz Dreieck (B21; B22)

				A	B	C	D
Wechsel der Belastungsfrequenz f_p [Hz]				1,0 ↑ 0,1	1,0 ↑ 0,1	10,0 ↑ 1,0	0,89 ↑ 0,09
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]				-	-	-	-
Wellenform				Sinus			
Bezogene Oberspannung S_O [-]				0,80	0,80	0,80	0,90
Charge				B12	B21	B13	B22
1	Abs.	$\Delta E_S^{0,0-1,0}$	[N/mm ²]	-0,5	4,8	4,4	-1,5
2	Änd.	$\bar{E}_{S,N}^{\text{II}}$	[N/mm ²]	-2,9	-4,3	-1,3	-36,9

Tabelle A 3.32: Absolute Änderung der Steifigkeits-Kenngrößen: Einfluss der Belastungsfrequenz (Sinus)

				A	B	C
Wechsel der Belastungsfrequenz f_p [Hz]				1,0 ↑ 0,1	0,89 ↑ 0,09	9,76 ↑ 0,98
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]				44,53/ 445,3	44,53/ 445,3	445,3/ 4453
Wellenform				Dreieck		
Bezogene Oberspannung S_O [-]				0,80	0,90	0,80
Charge				B21	B22	B23
1	Abs.	$\Delta E_S^{0,0-1,0}$	[N/mm ²]	3,6	4,2	4,4
2	Änd.	$\bar{E}_{S,N}^{\text{II}}$	[N/mm ²]	-2,9	-4,1	-0,1

Tabelle A 3.33: Absolute Änderung der Steifigkeits-Kenngrößen: Einfluss der Belastungsfrequenz (Dreieck)

A-3.2.4 Einfluss der Wellenform

				A	B	C	D
Wechsel der Wellenform				Sinus → Dreieck			
Belastungsfrequenz f_P [-]				0,1	1,0	0,09	0,89
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]				44,53	445,3	44,53	445,3
Bezogene Oberspannung S_O [-]				0,80	0,80	0,90	0,90
Charge				B21	B21	B22	B22
1	Absolute Werte der Kenngrößenänderung	Oberdehnung	$\Delta\varepsilon_O^{0,0;M}$ [%]	-0,07	0,01	-0,02	-0,05
2			$\Delta\varepsilon_O^I$ [%]	0,05	0,02	0,01	0,08
3			$\Delta\varepsilon_O^{II}$ [%]	0,01	0,03	0,07	0,04
4			$\Delta\varepsilon_O^{III}$ [%]	0,03	0,01	0,04	0,08
5			$\Delta\varepsilon_O^{0,0-1,0}$ [%]	0,09	0,06	0,12	0,19
6			$\bar{\varepsilon}_{O,N}^I$ [-]	-1,96E-6	-4,00E-7	-8,72E-6	-6,40E-6
7			$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{II}$ [-]	-5,61E-7	-9,94E-8	-5,60E-6	-2,20E-6
8			$\bar{\varepsilon}_{O,N}^{III}$ [-]	-3,38E-6	-6,49E-7	-8,94E-6	-1,12E-5
9			$\varepsilon_O^{1,0}$ [%]	0,02	0,12	0,15	0,13
10			$\Delta\varepsilon_O^{1,0;M}$ [%]	0,01	0,07	0,10	0,15
11	Absolute Werte der Kenngrößenänderung	Unterdehnung	$\Delta\varepsilon_U^{0,0;M}$ [%]	-0,02	-0,01	0,00	-0,07
12			$\Delta\varepsilon_U^I$ [%]	0,05	-0,01	-0,04	0,00
13			$\Delta\varepsilon_U^{II}$ [%]	0,02	0,02	0,08	0,00
14			$\Delta\varepsilon_U^{III}$ [%]	0,03	0,00	0,01	0,03
15			$\Delta\varepsilon_U^{0,0-1,0}$ [%]	0,10	0,00	0,06	0,03
16			$\bar{\varepsilon}_{U,N}^I$ [-]	-4,47E-7	-4,59E-7	-1,58E-5	-8,99E-6
17			$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{II}$ [-]	-4,02E-7	-7,05E-8	-2,66E-6	-1,51E-6
18			$\bar{\varepsilon}_{U,N}^{III}$ [-]	-1,57E-6	-2,70E-7	-4,79E-6	-2,14E-6
19			$\varepsilon_U^{1,0}$ [%]	0,12	0,07	0,11	0,08
20			$\Delta\varepsilon_U^{1,0;M}$ [%]	-0,11	-0,02	-0,06	-0,10
21			ε^B [%]	-0,02	0,09	0,12	0,09
22			$\Delta\varepsilon^{B;M}$ [%]	-0,02	0,04	0,07	0,11
23			$\Delta\bar{\varepsilon}_N^{II}$ [-]	-1,58E-7	-2,89E-8	-2,94E-6	-6,94E-7

Tabelle A 3.34: Absolute Änderung der Dehnungs-Kenngrößen: Einfluss der Wellenform

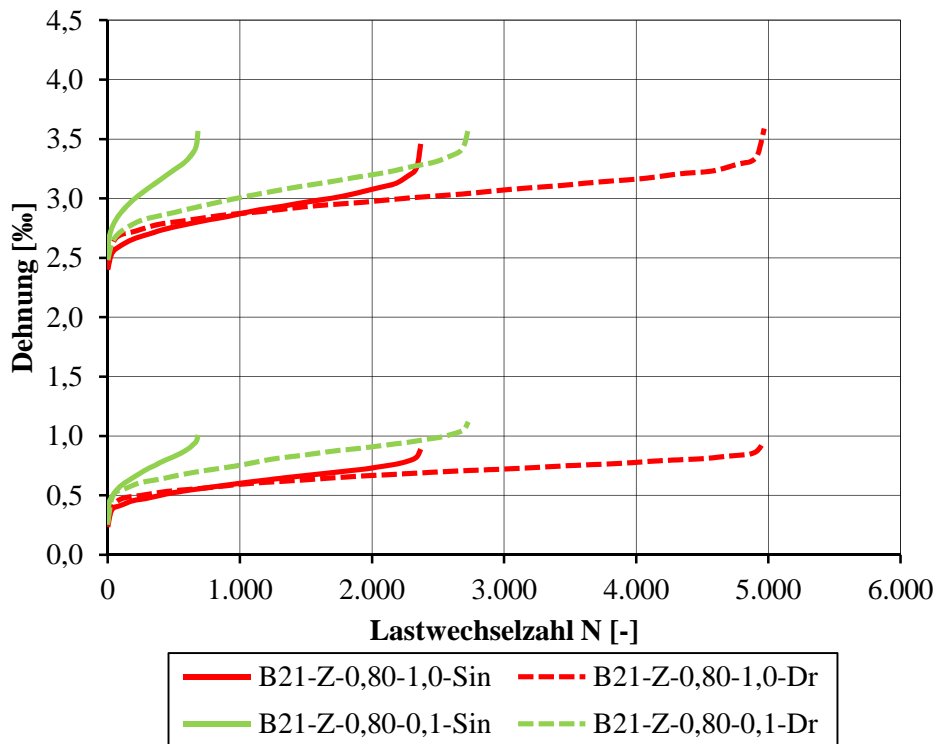


Abbildung A 3.7: Gemittelte Dehnungsentwicklungen: Einfluss der Wellenform (B21)

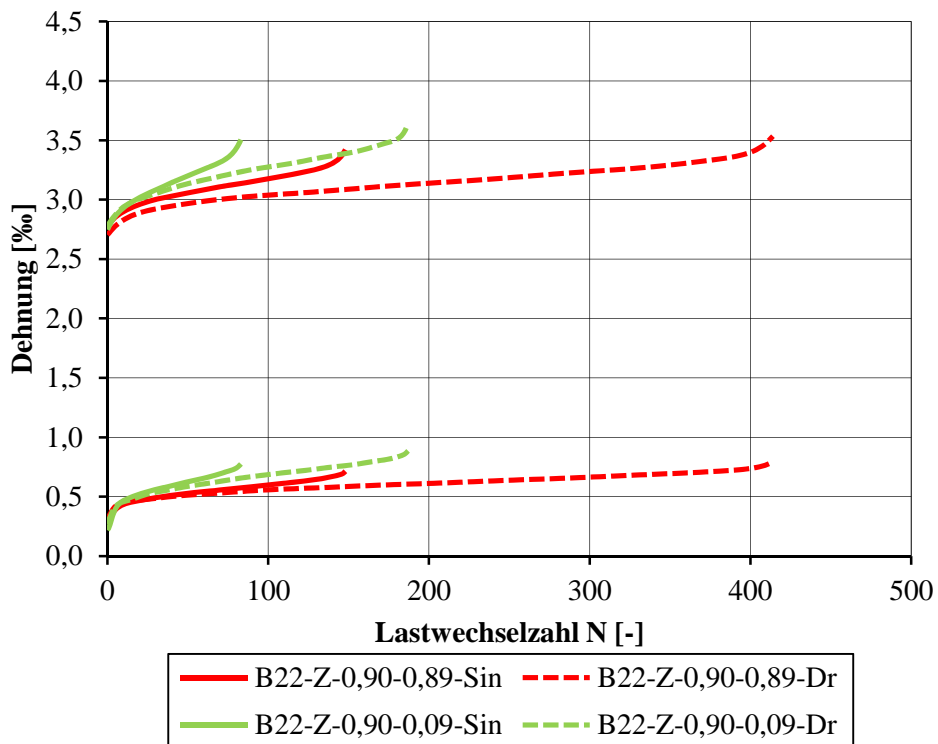


Abbildung A 3.8: Gemittelte Dehnungsentwicklungen: Einfluss der Wellenform (B22)

				A	B	C	D
Wechsel der Wellenform				Sinus → Dreieck			
Belastungsfrequenz f_P [-]				0,1	1,0	0,09	0,89
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]				44,53	445,3	44,53	445,3
Bezogene Oberspannung S_O [-]				0,80	0,80	0,90	0,90
Charge				B21	B21	B22	B22
1	Abs.	$\Delta E_S^{0,0-1,0}$	[N/mm ²]	1,0	-0,1	-1,4	4,3
2	Änd.	$\bar{E}_{S,N}^{II}$	[N/mm ²]	-1,9	-0,5	-42,6	-9,8

Tabelle A 3.35: Absolute Änderung der Steifigkeits-Kenngrößen: Einfluss der Wellenform

A-3.2.5 Systematische Zusammenhänge

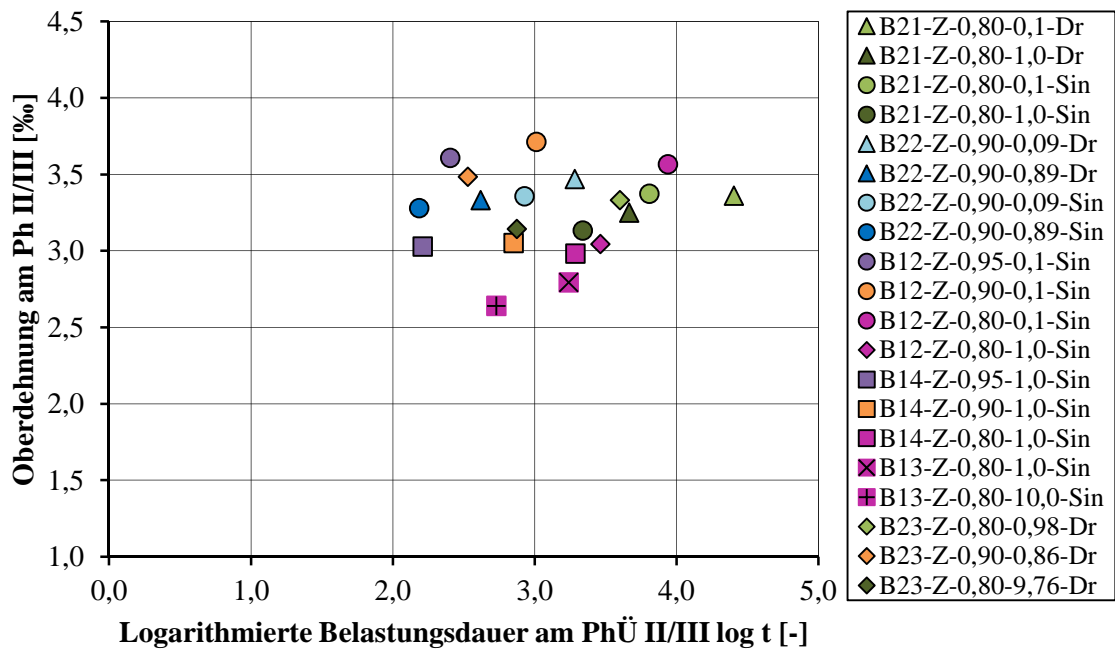


Abbildung A 3.9: Oberdehnung am Phasenübergang II/III dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer am Phasenübergang II/III (Mittelwerte)

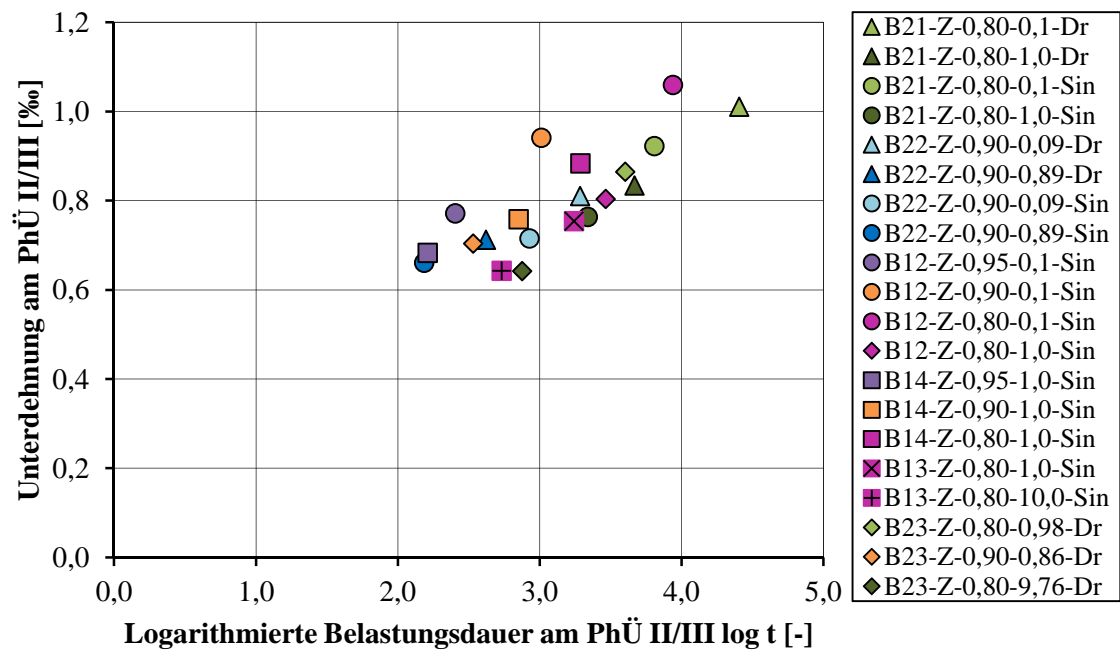


Abbildung A 3.10: Unterdehnung am Phasenübergang II/III dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer am Phasenübergang II/III (Mittelwerte)

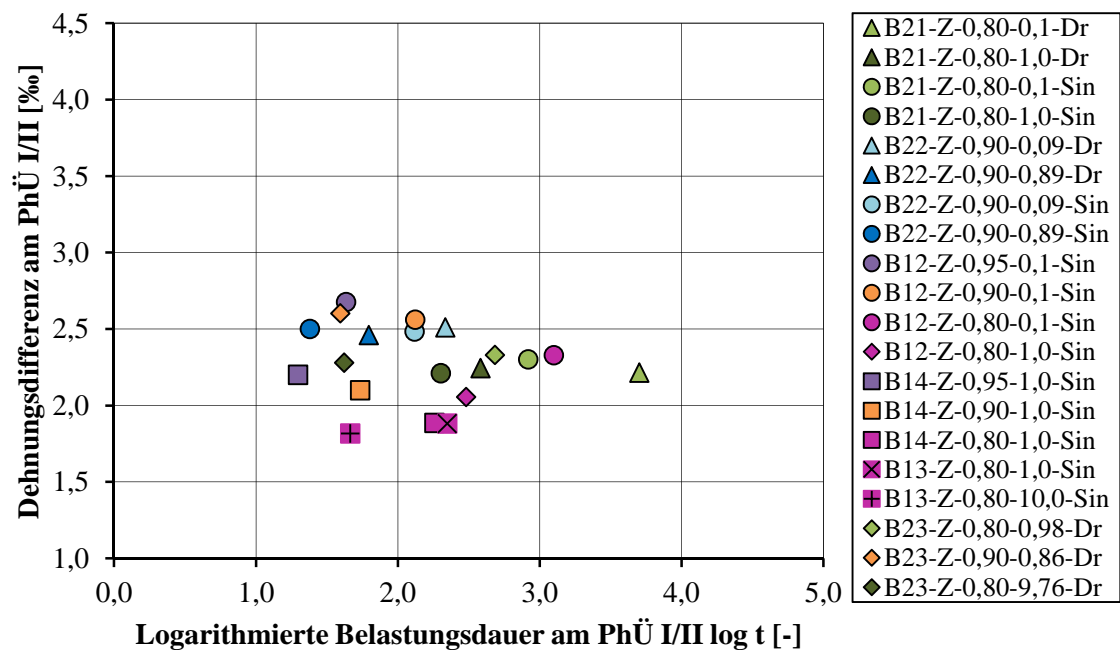


Abbildung A 3.11: Dehnungsdifferenz am Phasenübergang I/II dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer am Phasenübergang I/II (Mittelwerte)

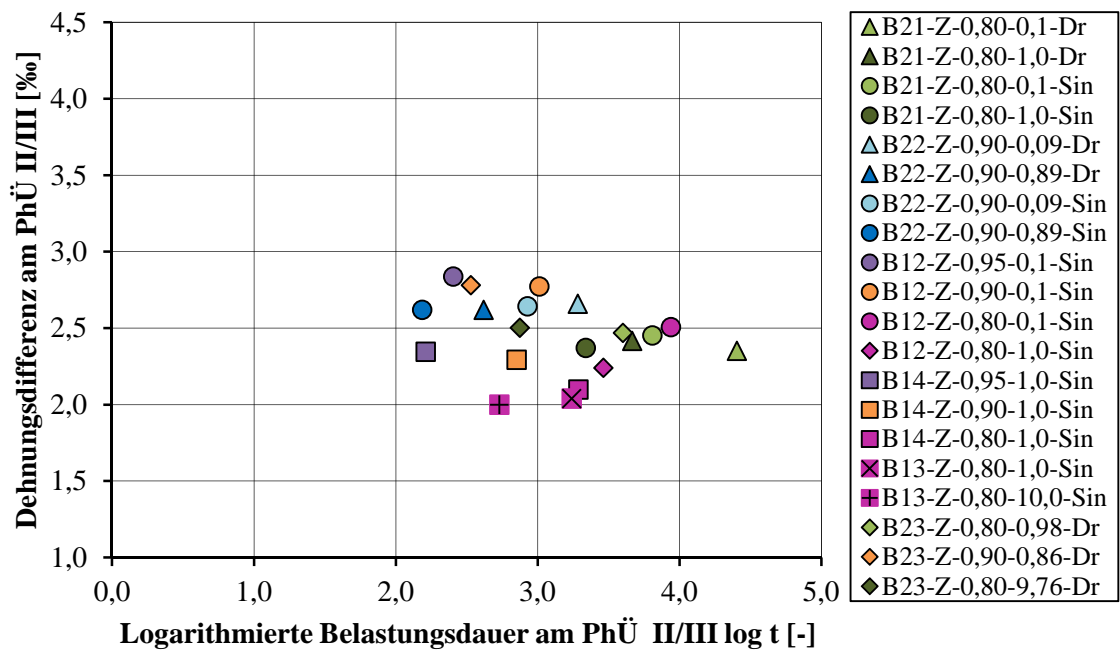


Abbildung A 3.12: Dehnungsdifferenz am Phasenübergang II/III dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer am Phasenübergang II/III (Mittelwerte)

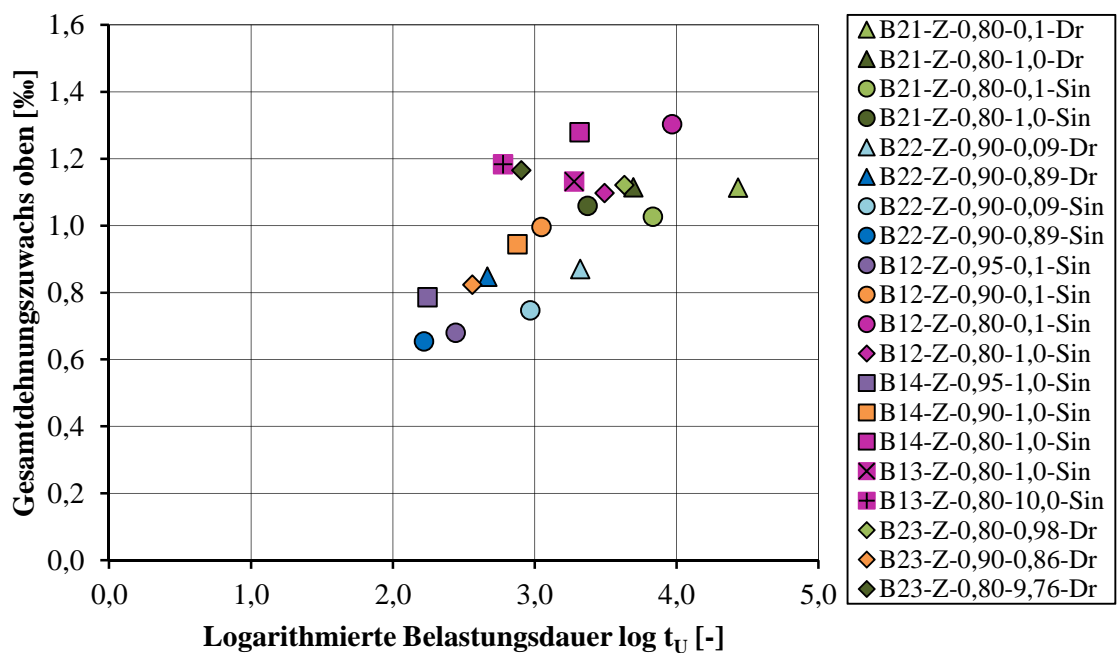


Abbildung A 3.13: Gesamtdehnungszuwachs bei Oberspannung dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen (Mittelwerte)

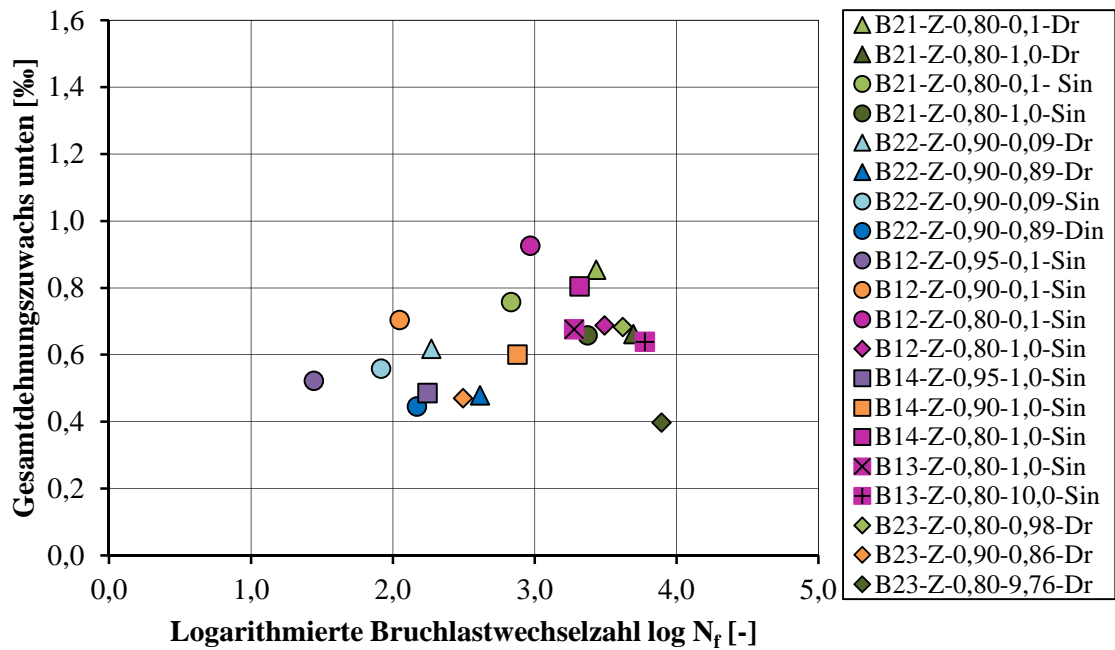


Abbildung A 3.14: Gesamtdehnungszuwachs bei Unterspannung dargestellt über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl (Mittelwerte)

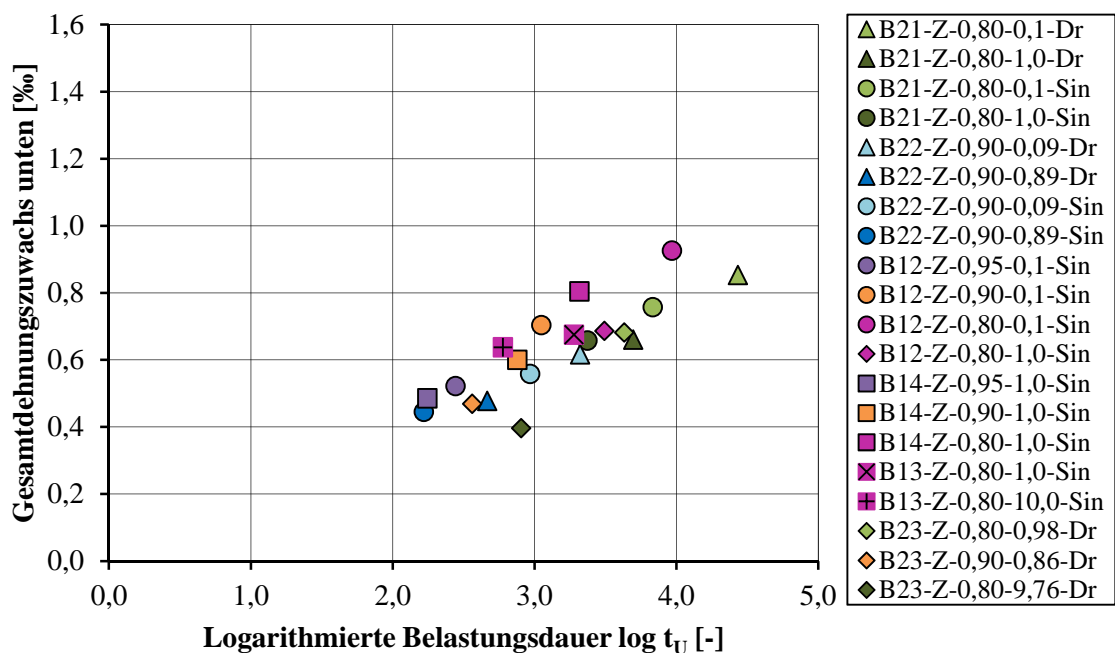


Abbildung A 3.15: Gesamtdehnungszuwachs bei Unterspannung dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen (Mittelwerte)

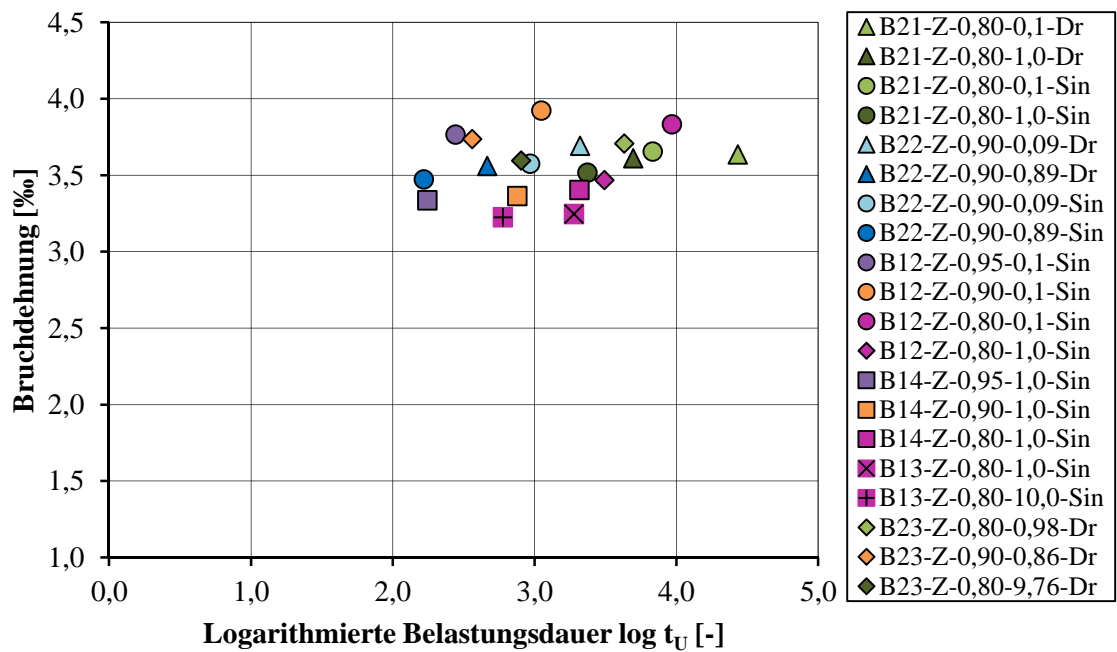


Abbildung A 3.16: Bruchdehnung dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen (Mittelwerte)

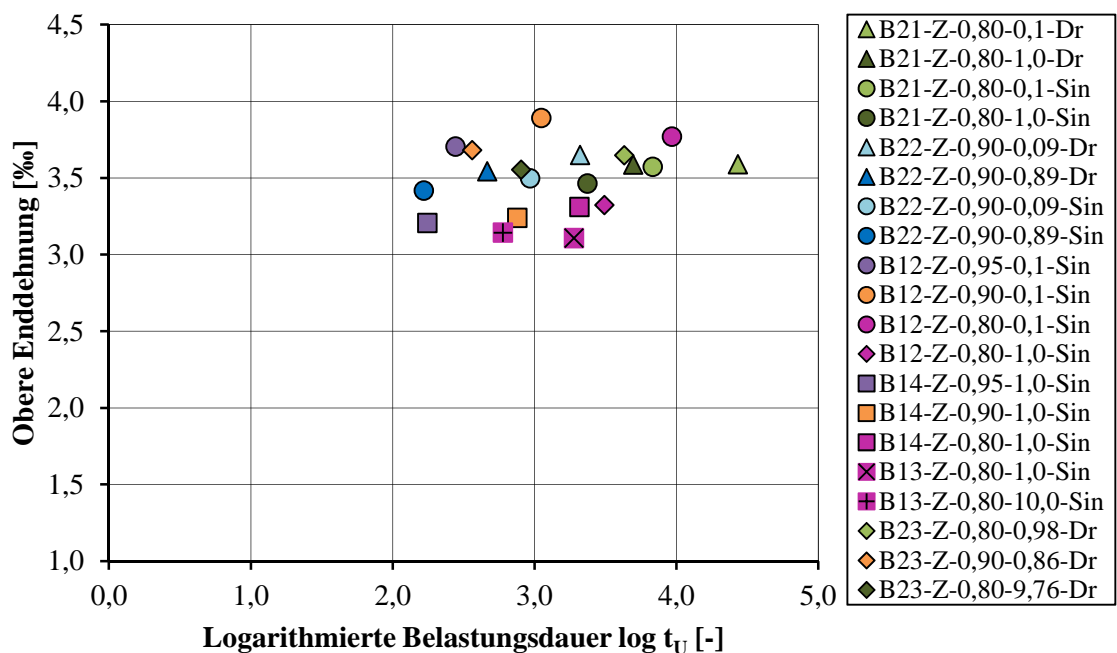


Abbildung A 3.17: Obere Enddehnung dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen (Mittelwerte)

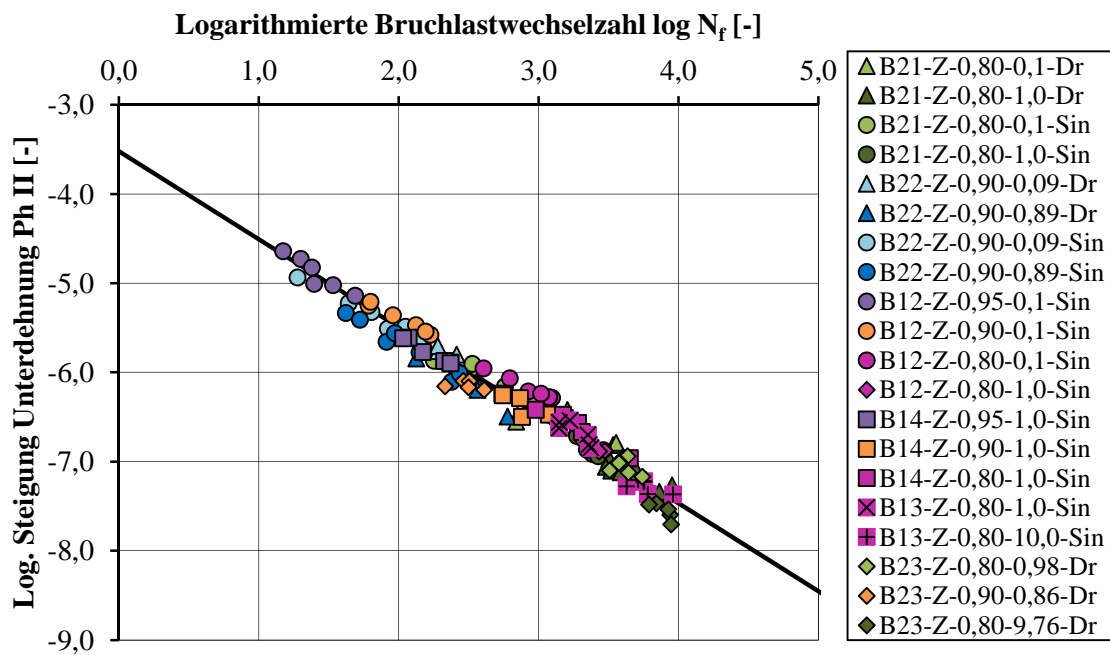


Abbildung A 3.18: Logarithmierte Steigung der Unterdehnung in der zweiten Phase dargestellt über der logarithmierten Bruchlastwechselzahl (Einzelwerte)

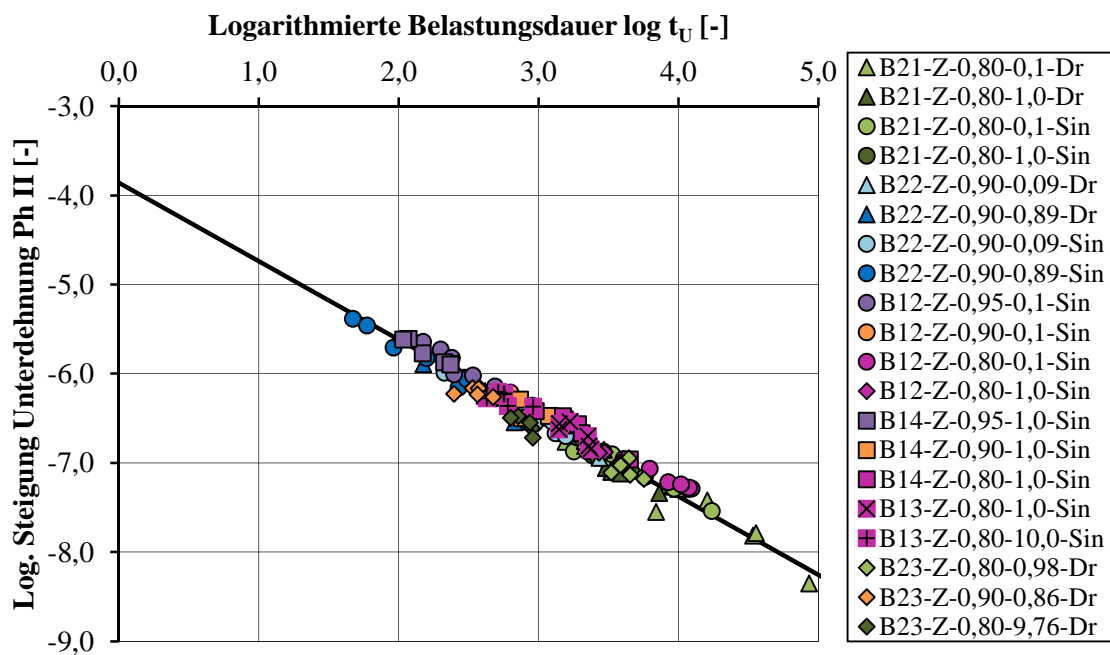


Abbildung A 3.19: Logarithmierte Steigung der Unterdehnung in der zweiten Phase dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen (Einzelwerte)

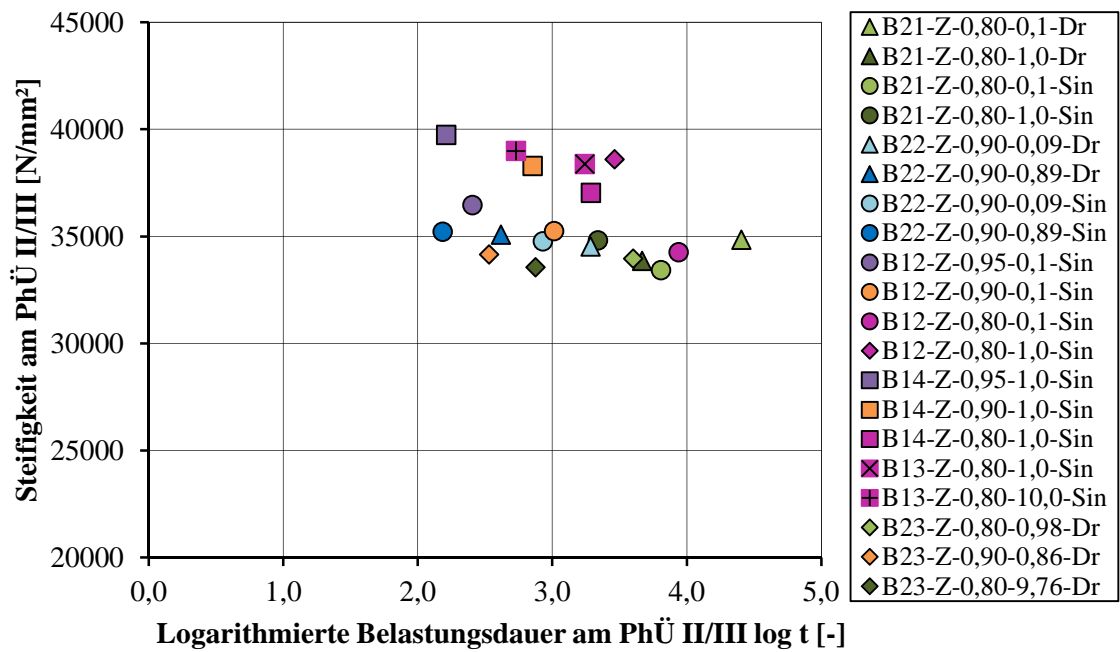


Abbildung A 3.20: Steifigkeit am Phasenübergang II/III dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer am Phasenübergang II/III (Mittelwerte)

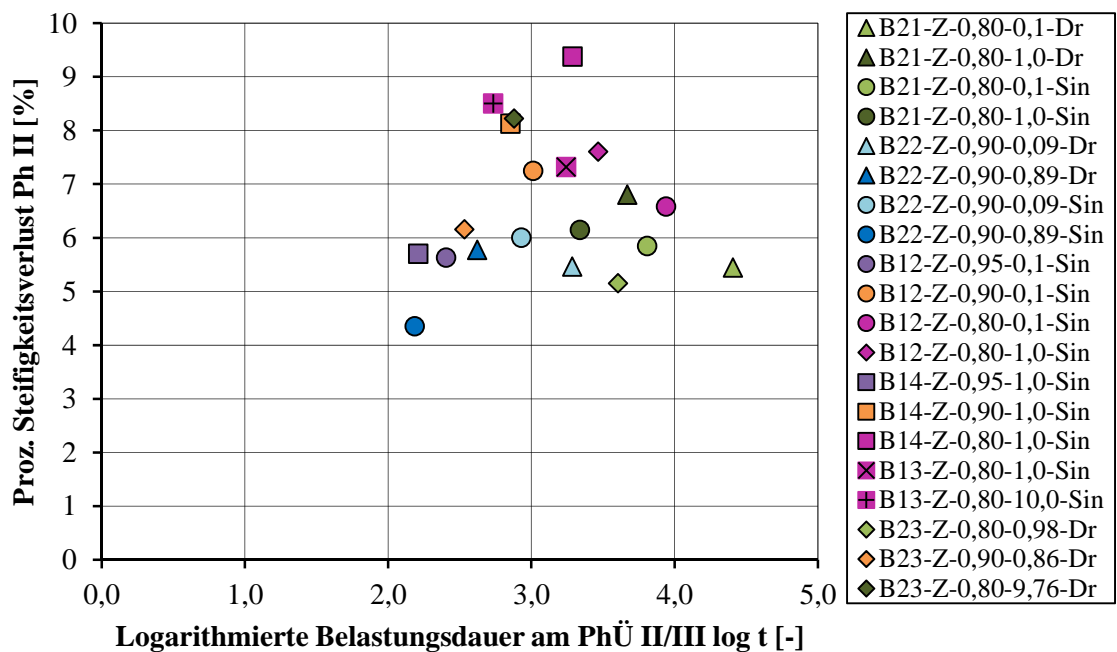


Abbildung A 3.21: Prozentualer Steifigkeitsverlust in der zweiten Phase dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer am Phasenübergang II/III

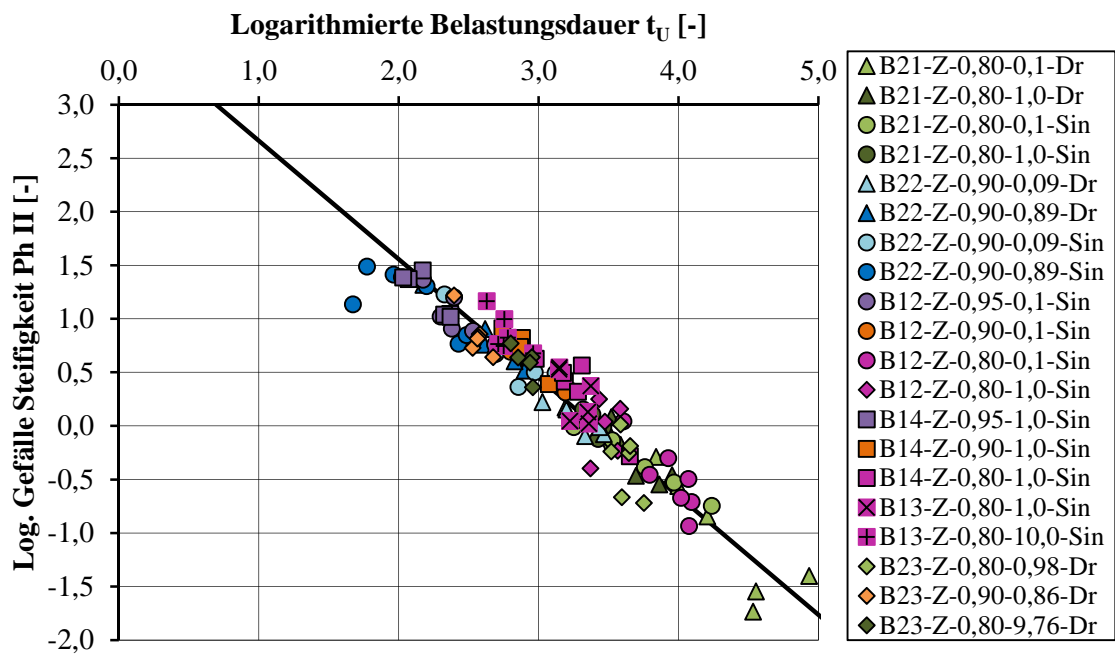


Abbildung A 3.22: Logarithmiertes Gefälle der Steifigkeitsentwicklung in der zweiten Phase dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen (Einzelwerte)

A-3.2.6 Statistische Auswertungen der Dehnungen

				F-Test					t-Test				
Verglichene Stichproben		Merkmal	Einfluss	v_1	v_2	\hat{F}	f	Ergebnis	n_1	n_2	\hat{t}	t	Ergebnis
Stichprobe 1	Stichprobe 2												
B12-Z-0,95-0,1-Sin	B12-Z-0,90-0,1-Sin*	ε^B	S_O	5	5	6,00	3,45	sig.	6	6	1,73	2,36	n. sig.
B12-Z-0,90-0,1-Sin*	B12-Z-0,80-0,1-Sin	ε^B	S_O	5	6	2,87	3,11	n. sig.	6	7	0,98	2,20	n. sig.
B14-Z-0,95-1,0-Sin	B14-Z-0,90-1,0-Sin*	ε^B	S_O	5	4	4,80	3,52	sig.	6	5	0,33	2,57	n. sig.
B14-Z-0,90-1,0-Sin	B14-Z-0,80-1,0-Sin*	ε^B	S_O	4	5	1,34	4,05	n. sig.	5	6	0,38	2,26	n. sig.
B23-Z-0,90-445,3-Dr	B23-Z-0,80-445,3-Dr*	ε^B	S_O	5	5	5,68	3,45	sig.	6	6	0,23	2,36	n. sig.
B12-Z-0,80-1,0-Sin*	B12-Z-0,80-0,1-Sin	ε^B	f_p	4	6	4,09	3,18	sig.	5	7	3,06	2,57	sig.
B13-Z-0,80-10,0-Sin	B13-Z-0,80-1,0-Sin*	ε^B	f_p	5	5	2,72	3,45	n. sig.	6	6	0,18	2,23	n. sig.
B21-Z-0,80-1,0-Sin	B21-Z-0,80-0,1-Sin*	ε^B	f_p	5	5	2,60	3,45	n. sig.	6	6	1,22	2,23	n. sig.
B21-Z-0,80-1,0-Dr	B21-Z-0,80-0,1-Dr*	ε^B	f_p	6	6	1,04	3,05	n. sig.	7	7	0,22	2,18	n. sig.
B22-Z-0,90-0,89-Dr*	B22-Z-0,90-0,09-Dr	ε^B	f_p	5	5	1,24	3,45	n. sig.	6	6	1,15	2,23	n. sig.
B22-Z-0,90-0,89-Sin*	B22-Z-0,90-0,09-Sin	ε^B	f_p	7	6	1,07	3,01	n. sig.	8	7	1,47	2,16	n. sig.
B23-Z-0,80-445,3-Dr*	B23-Z-0,80-445,3-Dr	ε^B	f_p	5	4	6,27	4,05	sig.	6	5	0,87	2,36	n. sig.
B21-Z-0,80-0,1-Sin*	B21-Z-0,80-0,1-Dr	ε^B	WF	5	6	1,13	3,11	n. sig.	6	7	0,15	2,20	n. sig.
B21-Z-0,80-1,0-Sin	B21-Z-0,80-1,0-Dr*	ε^B	WF	5	6	2,21	3,40	n. sig.	6	7	0,89	2,20	n. sig.
B22-Z-0,80-0,09-Sin	B22-Z-0,80-0,09-Dr*	ε^B	WF	6	5	1,95	3,11	n. sig.	7	6	1,33	2,20	n. sig.
B22-Z-0,80-0,89-Sin	B22-Z-0,80-0,89-Dr*	ε^B	WF	7	5	2,27	2,88	n. sig.	8	6	0,98	2,18	n. sig.

* Stichprobe mit größerer Varianz sig.: signifikant unterschiedlich n. sig.: nicht signifikant unterschiedlich

Tabelle A 3.36: Signifikanztests: Einfluss der bezogenen Oberspannung, der Belastungsfrequenz und der Wellenform auf die Bruchdehnung

				F-Test					t-Test				
Verglichene Stichproben		Merkmal	Einfluss	v_1	v_2	\hat{F}	f	Ergebnis	n_1	n_2	\hat{t}	t	Ergebnis
Stichprobe 1	Stichprobe 2												
B12-Z-0,95-0,1-Sin	B12-Z-0,90-0,1-Sin*	$\varepsilon_O^{1,0}$	S_O	5	5	3,78	3,45	sig.	6	6	2,48	2,36	sig.
B12-Z-0,90-0,1-Sin*	B12-Z-0,80-0,1-Sin	$\varepsilon_O^{1,0}$	S_O	5	6	1,23	3,11	n. sig.	6	7	1,42	2,20	n. sig.
B14-Z-0,95-1,0-Sin*	B14-Z-0,90-1,0-Sin	$\varepsilon_O^{1,0}$	S_O	5	4	2,36	3,52	n. sig.	6	5	0,32	2,26	n. sig.
B14-Z-0,90-1,0-Sin	B14-Z-0,80-1,0-Sin*	$\varepsilon_O^{1,0}$	S_O	4	5	1,91	3,52	n. sig.	5	6	0,69	2,26	n. sig.
B23-Z-0,90-445,3-Dr	B23-Z-0,80-445,3-Dr*	$\varepsilon_O^{1,0}$	S_O	5	5	20,9	3,45	sig.	6	6	0,32	2,57	n. sig.
B12-Z-0,80-1,0-Sin*	B12-Z-0,80-0,1-Sin	$\varepsilon_O^{1,0}$	f_p	4	6	1,48	3,18	n. sig.	5	7	4,45	2,23	sig.
B13-Z-0,80-10,0-Sin	B13-Z-0,80-1,0-Sin*	$\varepsilon_O^{1,0}$	f_p	5	5	1,84	3,45	n. sig.	6	6	0,25	2,23	n. sig.
B21-Z-0,80-1,0-Sin	B21-Z-0,80-0,1-Sin*	$\varepsilon_O^{1,0}$	f_p	5	5	3,49	3,45	sig.	6	6	1,02	2,31	n. sig.
B21-Z-0,80-1,0-Dr	B21-Z-0,80-0,1-Dr*	$\varepsilon_O^{1,0}$	f_p	6	6	3,32	3,05	sig.	7	7	0,03	2,26	n. sig.
B22-Z-0,90-0,89-Dr	B22-Z-0,90-0,09-Dr*	$\varepsilon_O^{1,0}$	f_p	5	5	1,41	3,45	n. sig.	6	6	1,17	2,23	n. sig.
B22-Z-0,90-0,89-Sin*	B22-Z-0,90-0,09-Sin	$\varepsilon_O^{1,0}$	f_p	7	6	1,71	3,01	n. sig.	8	7	1,26	2,16	n. sig.
B23-Z-0,80-445,3-Dr*	B23-Z-0,80-4453-Dr	$\varepsilon_O^{1,0}$	f_p	5	4	3,21	4,05	n. sig.	6	5	0,70	2,26	n. sig.
B21-Z-0,80-0,1-Sin	B21-Z-0,80-0,1-Dr*	$\varepsilon_O^{1,0}$	WF	5	6	1,18	3,40	n. sig.	6	7	0,13	2,20	n. sig.
B21-Z-0,80-1,0-Sin	B21-Z-0,80-1,0-Dr*	$\varepsilon_O^{1,0}$	WF	5	6	1,24	3,40	n. sig.	6	7	1,67	2,20	n. sig.
B22-Z-0,80-0,09-Sin	B22-Z-0,80-0,09-Dr*	$\varepsilon_O^{1,0}$	WF	6	5	2,79	3,11	n. sig.	7	6	1,99	2,20	n. sig.
B22-Z-0,80-0,89-Sin	B22-Z-0,80-0,89-Dr*	$\varepsilon_O^{1,0}$	WF	7	5	1,16	2,88	n. sig.	8	6	1,67	2,18	n. sig.

* Stichprobe mit größerer Varianz sig.: signifikant unterschiedlich n. sig.: nicht signifikant unterschiedlich

Tabelle A 3.37: Signifikanztests: Einfluss der bezogenen Oberspannung, der Belastungsfrequenz und der Wellenform auf die Enddehnung

A-4 Dauerstandversuche bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten

A-4.1 Ergänzende Darstellungen der Dehnungsentwicklungen

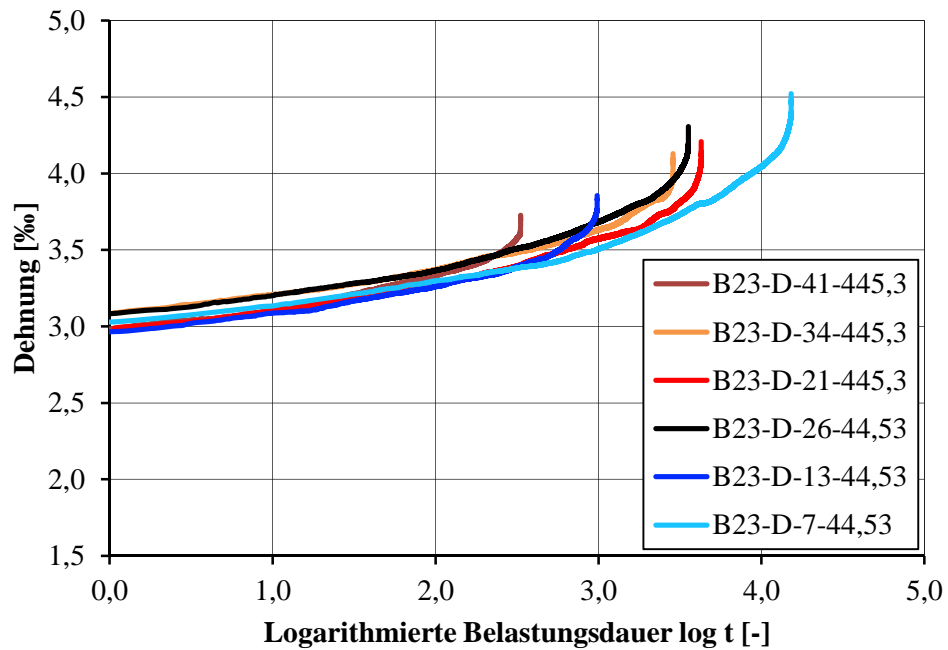


Abbildung A 4.1: Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,90$ dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer

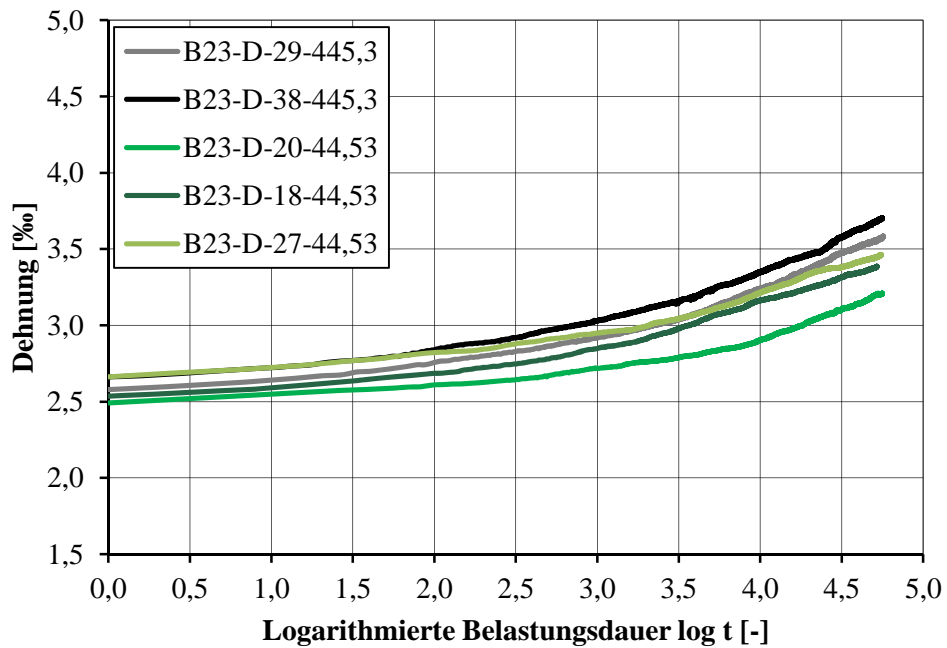


Abbildung A 4.2: Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,80$ dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer

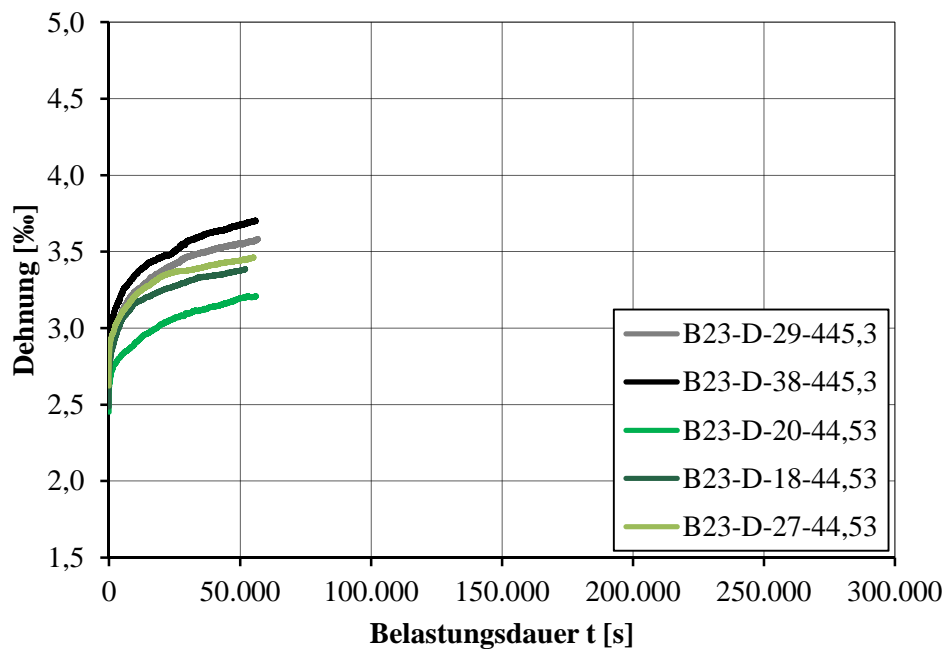


Abbildung A 4.3: Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,80$ (weitere Skalierung)

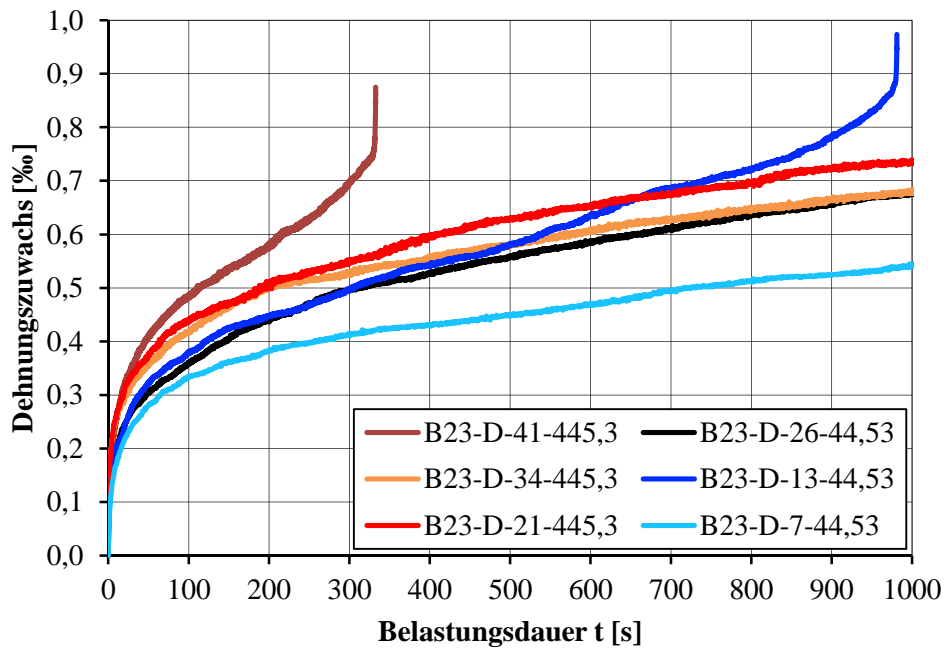


Abbildung A 4.4: Dehnungszuwachs in der Anfangsphase bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,90$

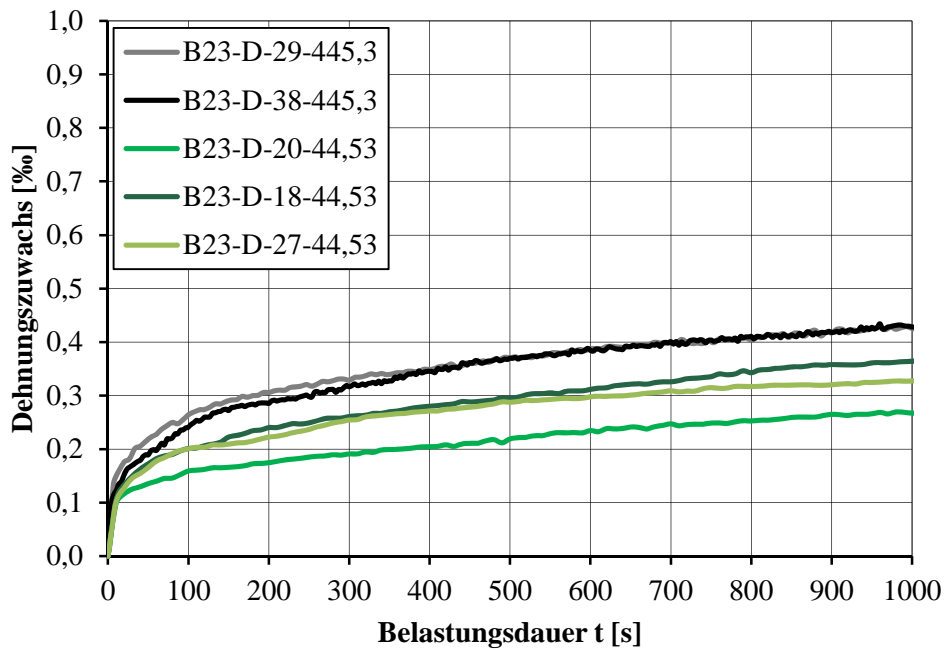


Abbildung A 4.5: Dehnungszuwachs in der Anfangsphase bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,80$

A-4.2 Werte der Kenngrößen

			A	B	C	D	E	F	G
Belastung			Dauerstand			Dauerstand			
Beanspruchungsniveau			0,80			0,80			
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]			445,3			44,53			
Probe			B23-D-29	B23-D-38	Mittelwert	B23-D-20	B23-D-18	B23-D-27	Mittelwert
1	$\varepsilon_D^{0,0}$	[‰]	2,49	2,60	2,55	2,45	2,48	2,62	2,52
2	t_{Abbruch}	[s]	56820	56016	71741	56150	52060	55260	54490
3	ε_D^{200s}	[‰]	2,80	2,88	2,84	2,63	2,72	2,84	2,73
4	$\Delta\varepsilon_D^{200s}$	[‰]	0,31	0,29	0,30	0,18	0,24	0,22	0,21
5	ε_D^{320s}	[‰]	2,83	2,92	2,87	2,65	2,75	2,88	2,76
6	$\Delta\varepsilon_D^{320s}$	[‰]	0,34	0,32	0,33	0,20	0,26	0,26	0,24

Tabelle A 4.1: Kenngrößen der Dehnungsentwicklung bei Dauerstandsbeanspruchung $S_D = 0,80$

			A	B	C	D	E	F	G	H
Belastung			Dauerstand				Dauerstand			
Beanspruchungsniveau			0,90				0,90			
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]			445,3				44,53			
Probe			B23-D-41	B23-D-34	B23-D-21	Mittelwert	B23-D-26	B23-D-13	B23-D-7	Mittelwert
1	$\varepsilon_D^{0,0}$	[‰]	2,85	2,95	2,84	2,88	3,01	2,88	2,97	2,95
2	$\varepsilon_D^{I/II}$	[‰]	3,26	3,49	3,55	3,43	3,62	3,28	3,72	3,54
3	$\varepsilon_D^{II/III}$	[‰]	3,60	3,88	3,90	3,79	4,07	3,66	4,19	3,98
4	$\Delta\varepsilon_D^I$	[‰]	0,41	0,54	0,71	0,55	0,61	0,40	0,75	0,59
5	$\Delta\varepsilon_D^{II}$	[‰]	0,34	0,39	0,35	0,36	0,45	0,38	0,47	0,44
6	$\Delta\varepsilon_D^{III,B}$	[‰]	0,13	0,25	0,31	0,23	0,24	0,19	0,33	0,25
7	$\Delta\varepsilon_D^{I-III,B}$	[‰]	0,88	1,18	1,37	1,14	1,30	0,97	1,56	1,28
8	$\bar{\varepsilon}_{D,t}^I$	[s ⁻¹]	8,41E-6	1,65E-6	8,55E-7	3,64E-6	8,75E-7	3,30E-6	2,49E-7	1,47E-6
9	$\bar{\varepsilon}_{D,t}^{II}$	[s ⁻¹]	1,08E-6	1,60E-7	1,14E-7	4,50E-7	1,51E-7	4,66E-7	4,19E-8	2,20E-7
10	$\bar{\varepsilon}_{D,t}^{III}$	[s ⁻¹]	3,51E-5	1,47E-6	7,17E-7	1,24E-5	1,29E-6	2,39E-6	1,99E-7	1,29E-6
11	ε_D^B	[‰]	3,73	4,13	4,21	4,02	4,306	3,856	4,52	4,23
12	t_U	[s]	333	287	426	2487	3558	981	15205	6581
13	I/II	[-]	0,15	0,11	0,19	0,151	0,20	0,12	0,20	0,173
14	II/III	[-]	0,99	0,94	0,90	0,943	0,95	0,92	0,89	0,919

Tabelle A 4.2: Kenngrößen Dehnungsentwicklung bei Dauerstandsbeanspruchung $S_D = 0,90$

			A	B	C	D	E	F	G	H
Belastung			Dauerstand				Dauerstand			
Beanspruchungsniveau			0,90				0,90			
Belastungsgeschwindigkeit \dot{k} [kN·s ⁻¹]			445,3				44,53			
Probe			B23-D-41	B23-D-34	B23-D-21	Mittelwert	B23-D-26	B23-D-13	B23-D-7	Mittelwert
15	ε_D^{200s}	[‰]	3,43	3,45	3,35	3,411	3,45	3,33	3,349	3,38
16	$\Delta\varepsilon_D^{200s}$	[‰]	0,58	0,50	0,51	0,530	0,44	0,45	0,384	0,43
17	ε_D^{320s}	[‰]	3,58	3,49	3,40	3,488	3,51	3,40	3,38	3,43
18	$\Delta\varepsilon_D^{320s}$	[‰]	0,73	0,54	0,56	0,608	0,50	0,51	0,42	0,48

Tabelle A 4.3: Kenngrößen Dehnungsentwicklung bei Dauerstandbeanspruchung $S_D = 0,90$ (Fortsetzung)

A-4.3 Systematische Zusammenhänge

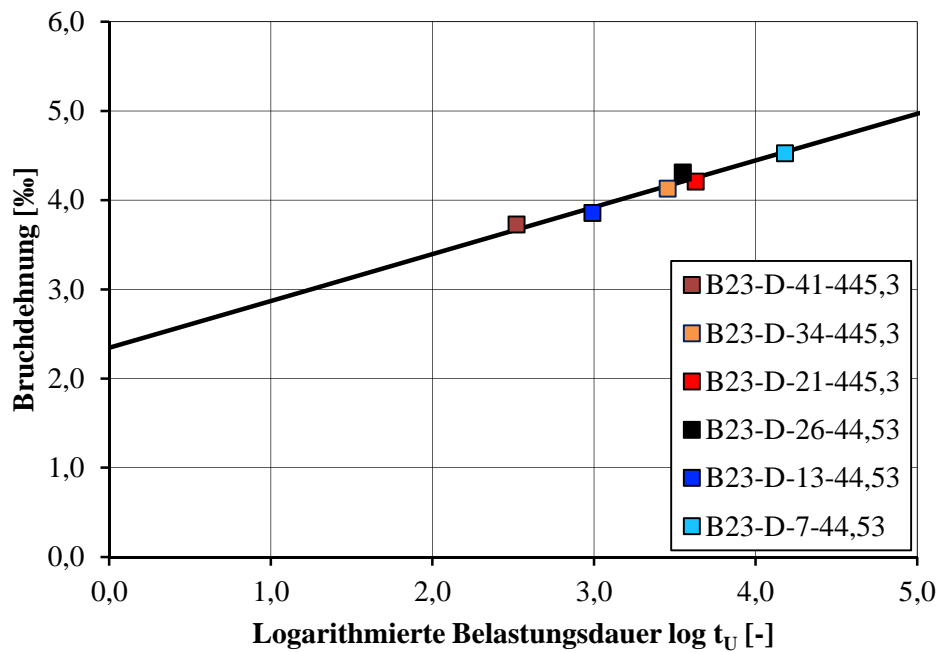


Abbildung A 4.6: Bruchdehnung dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen $S_D = 0,90$

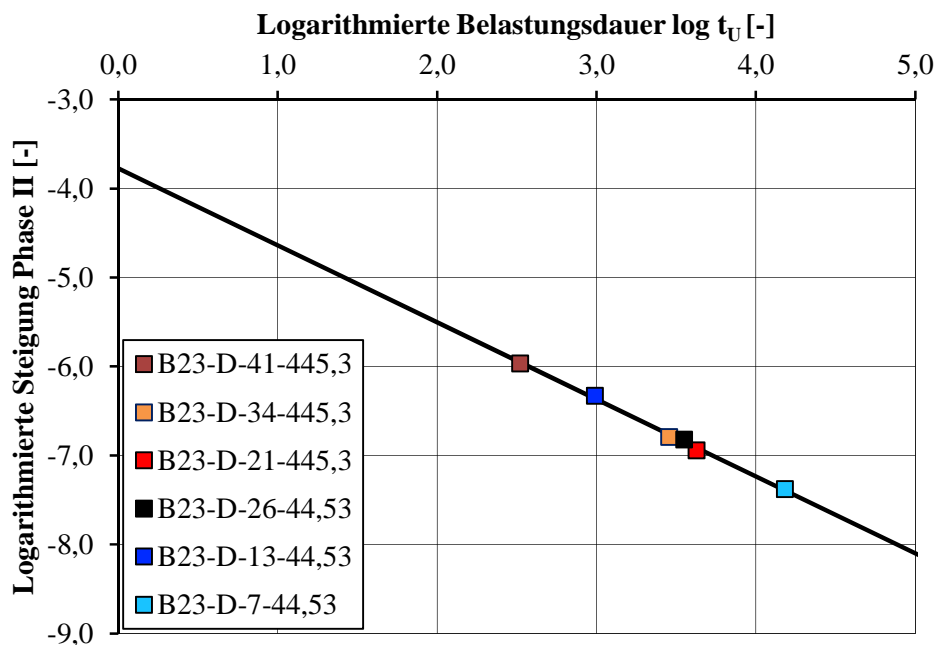


Abbildung A 4.7: Logarithmierte Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen $S_D = 0,90$

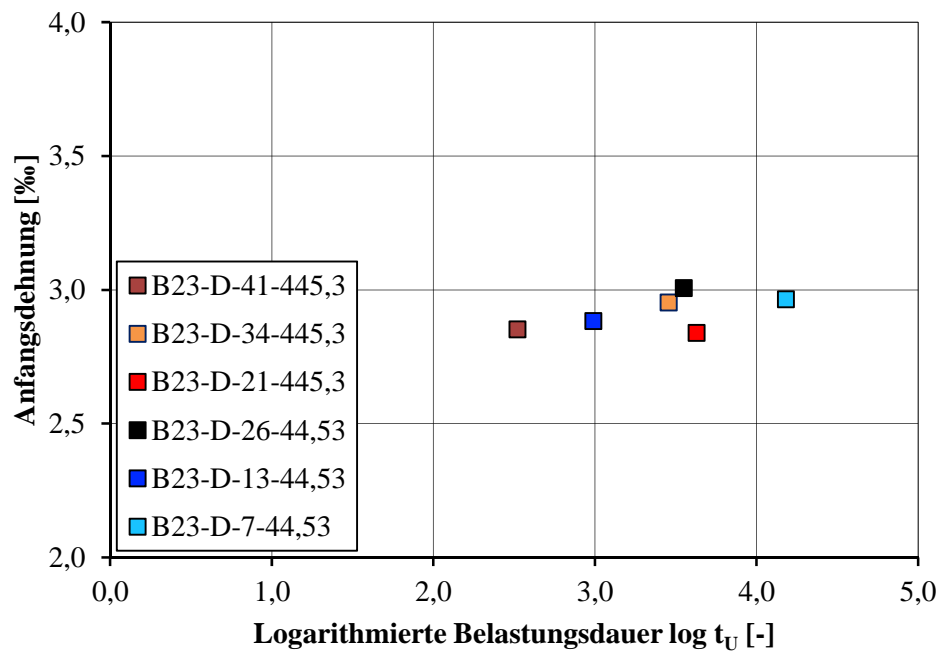


Abbildung A 4.8: Anfangsdehnung dargestellt über der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen $S_D = 0,90$

A-5 Kombinierte Auswertung des Materialverhaltens bei verschiedenen Beanspruchungsarten

A-5.1 Vergleich der zyklischen Dehnungsentwicklungen mit den Spannungs-Dehnungslinien infolge monoton steigender Beanspruchung

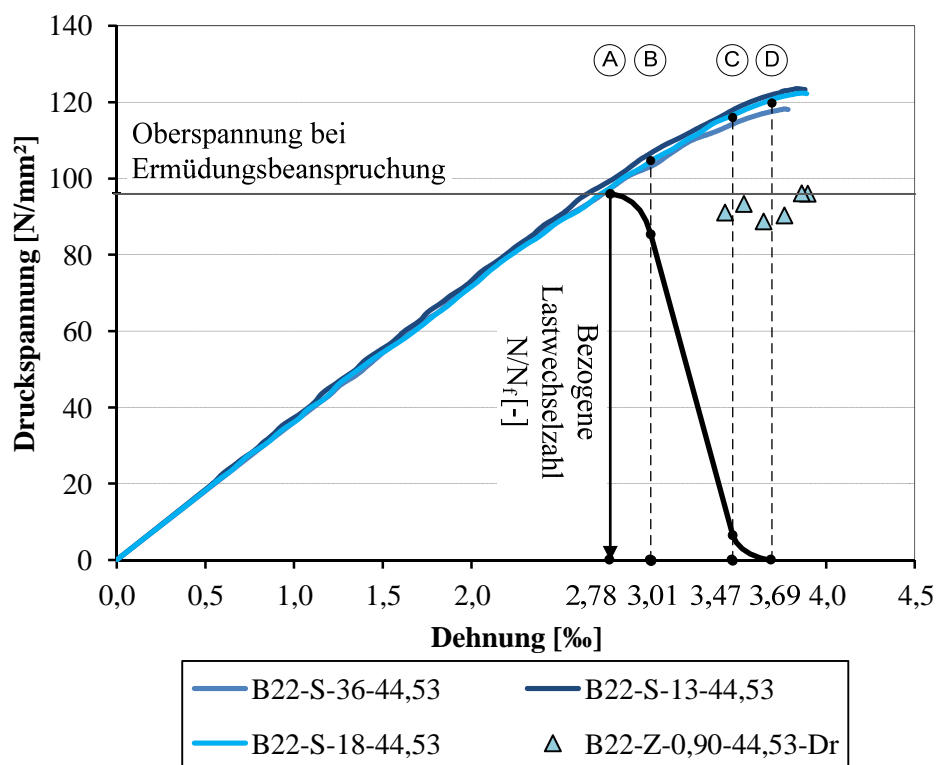


Abbildung A 5.1: Vergleich des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung, B22, $S_0 = 0,90$, $k = 44,53 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$

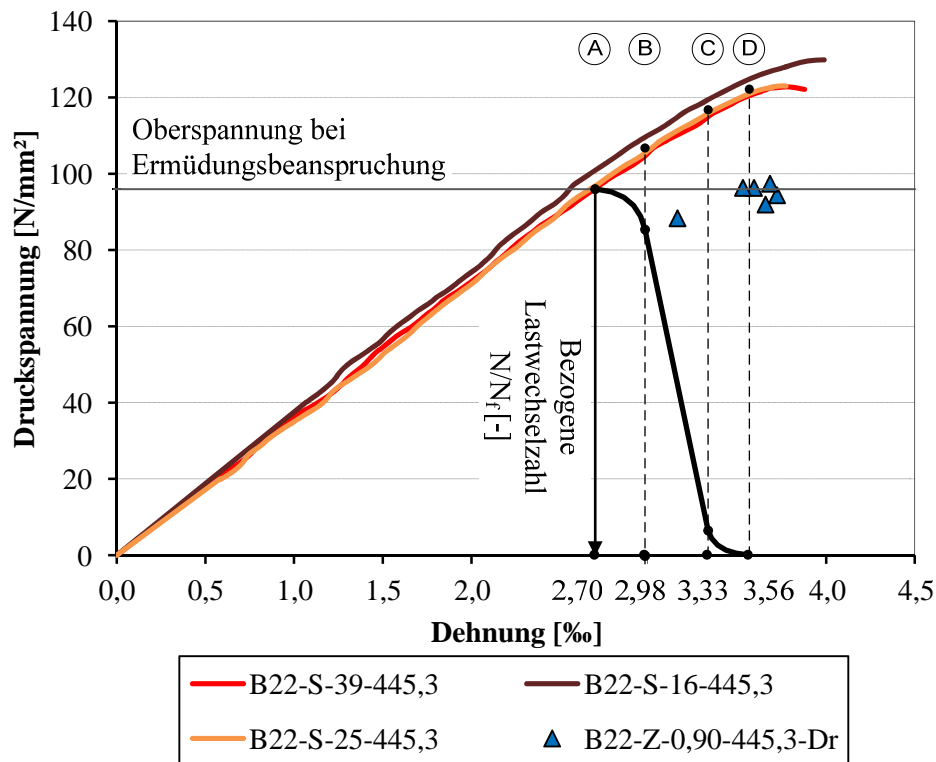


Abbildung A 5.2: Vergleich des Dehnungsverhaltens bei monoton steigender und zyklischer Beanspruchung, B22, $S_0 = 0,90$, $\dot{k} = 445,3 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$

Verglichene Stichproben		Merkmal	P [%]
Stichprobe 1	Stichprobe 2		
B21-Z-0,80-44,53-Dr	B21-S-44,53	ϵ^B	87
B21-Z-0,80-445,3-Dr	B21-S-445,3	ϵ^B	70
B22-Z-0,90-44,53-Dr	B22-S-44,53	ϵ^B	70
B22-Z-0,90-445,3-Dr	B22-S-445,3	ϵ^B	85
B23-Z-0,80-445,3-Dr	B23-S-445,3	ϵ^B	92
B23-Z-0,90-445,3-Dr	B23-S-445,3	ϵ^B	100

P: Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Bruchdehnungen infolge zyklischer Beanspruchungen den Mittelwert der Bruchdehnungen infolge monoton steigender Beanspruchung unterschreiten

Tabelle A 5.1: Unterschreitungswahrscheinlichkeiten

A-5.2 Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung und Dauerstandbeanspruchung

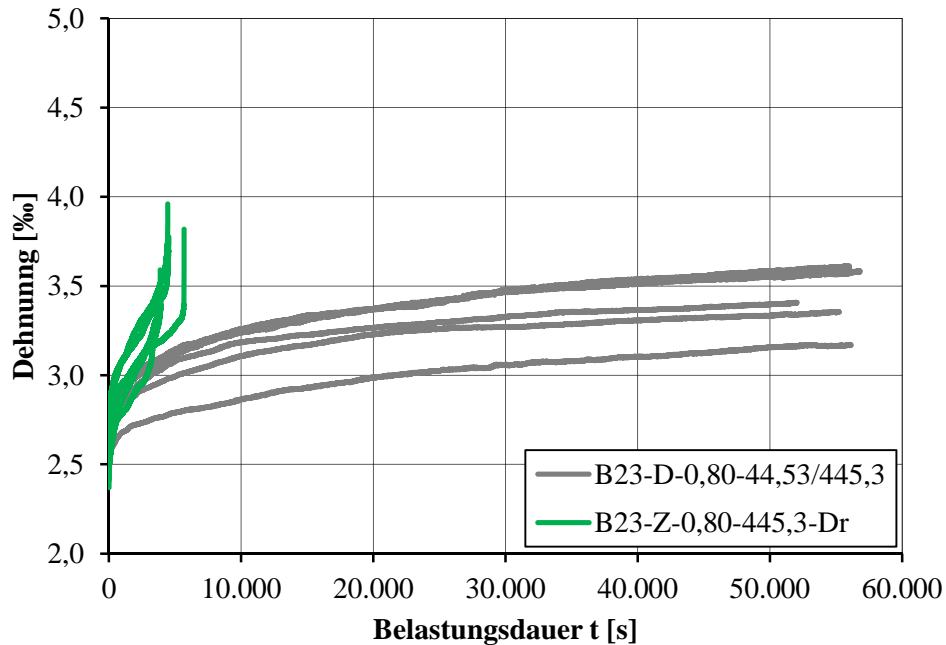


Abbildung A 5.3: Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_0 = 0,80$, $f_p = 0,98$ Hz, $\dot{k} = 445,3$ kN \cdot s $^{-1}$ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,80$

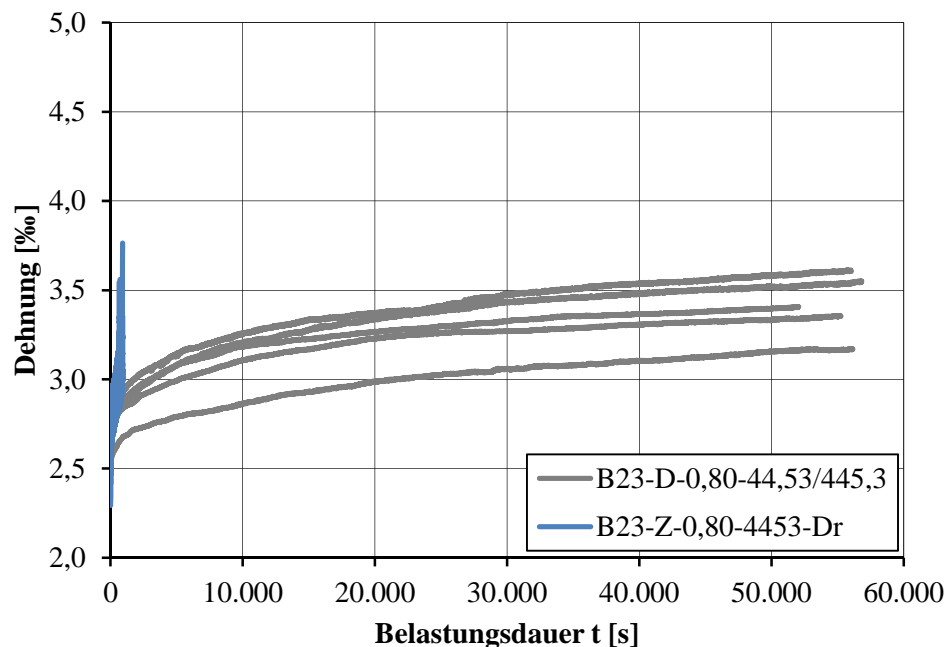


Abbildung A 5.4: Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_0 = 0,80$, $f_p = 9,76$ Hz, $\dot{k} = 4453$ kN \cdot s $^{-1}$ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,80$

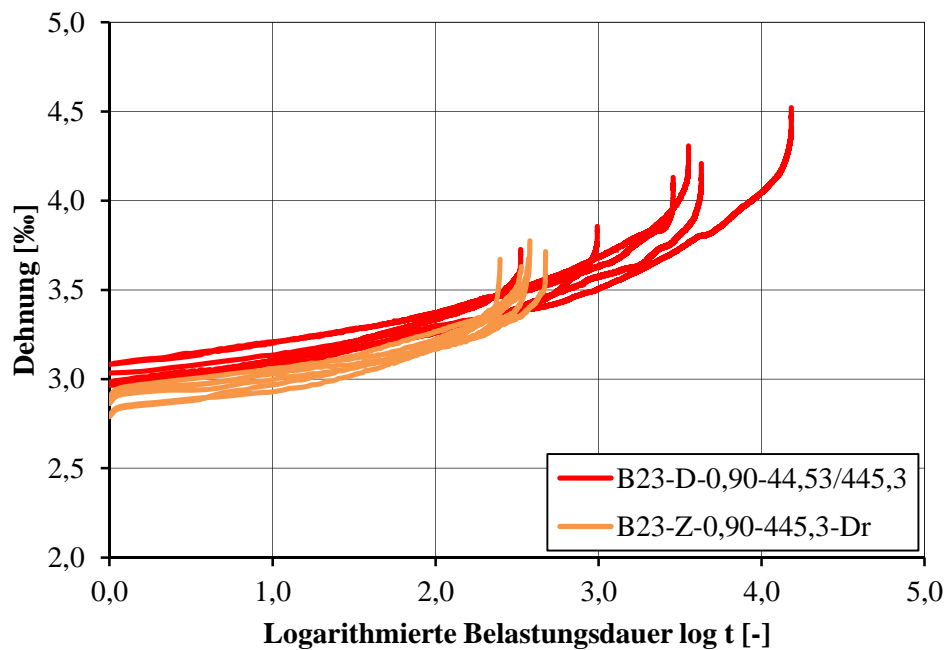


Abbildung A 5.5: Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_O = 0,90$, $f_p = 0,86$ Hz, $\dot{k} = 445,3$ kN \cdot s $^{-1}$ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,90$ (Darstellung über der logarithmierten Belastungsdauer)

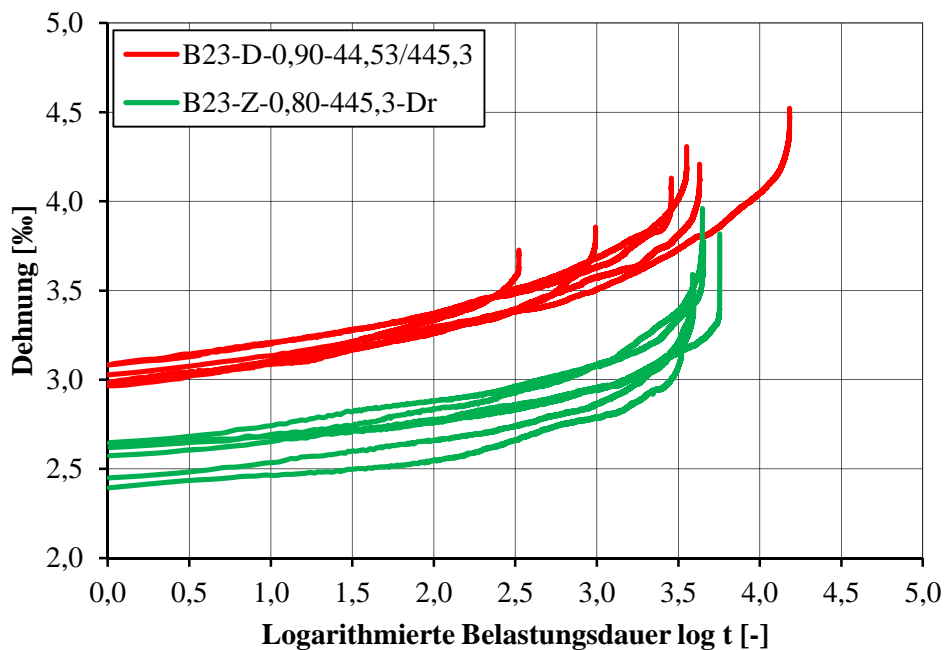


Abbildung A 5.6: Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_O = 0,80$, $f_p = 0,98$ Hz, $\dot{k} = 445,3$ kN \cdot s $^{-1}$ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,90$ (Darstellung über der logarithmierten Belastungsdauer)

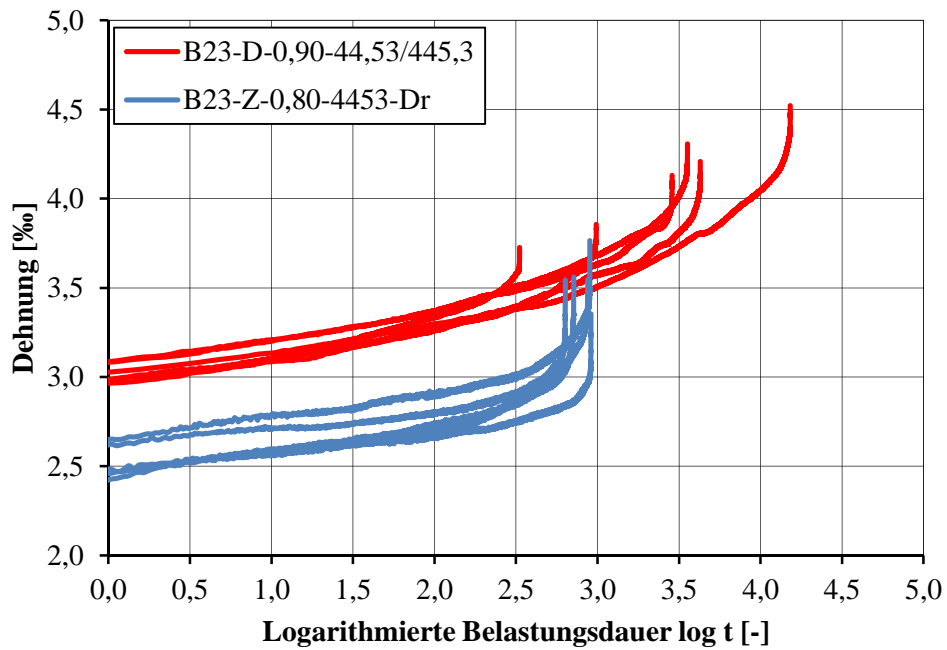


Abbildung A 5.7: Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_O = 0,80$, $f_P = 9,76$ Hz, $\dot{k} = 4453$ kN \cdot s $^{-1}$ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,90$ (Darstellung über der logarithmierten Belastungsdauer)

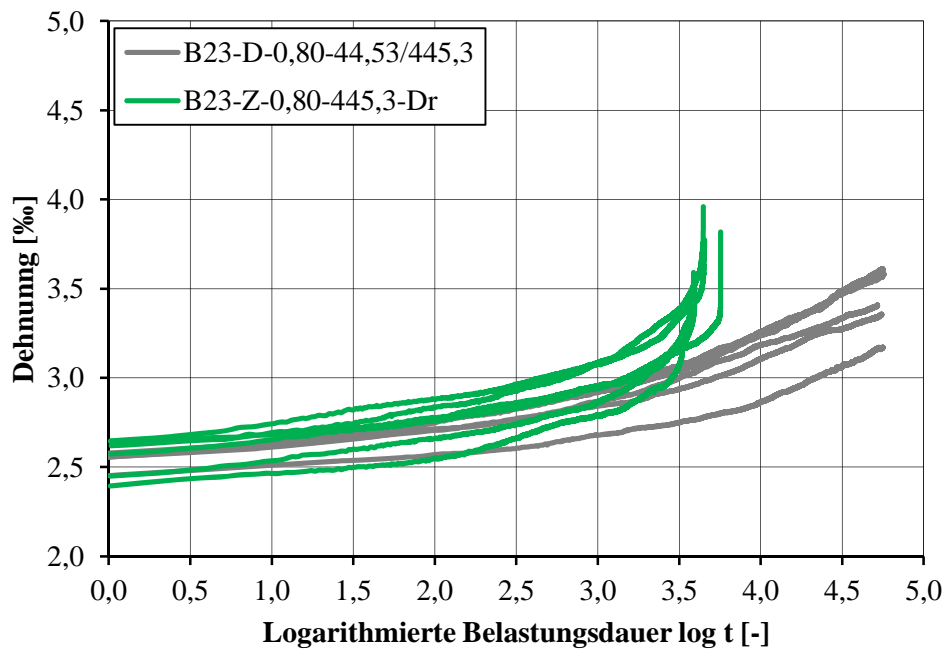


Abbildung A 5.8: Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_O = 0,80$, $f_P = 0,98$ Hz, $\dot{k} = 445,3$ kN \cdot s $^{-1}$ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,80$ (Darstellung über der logarithmierten Belastungsdauer)

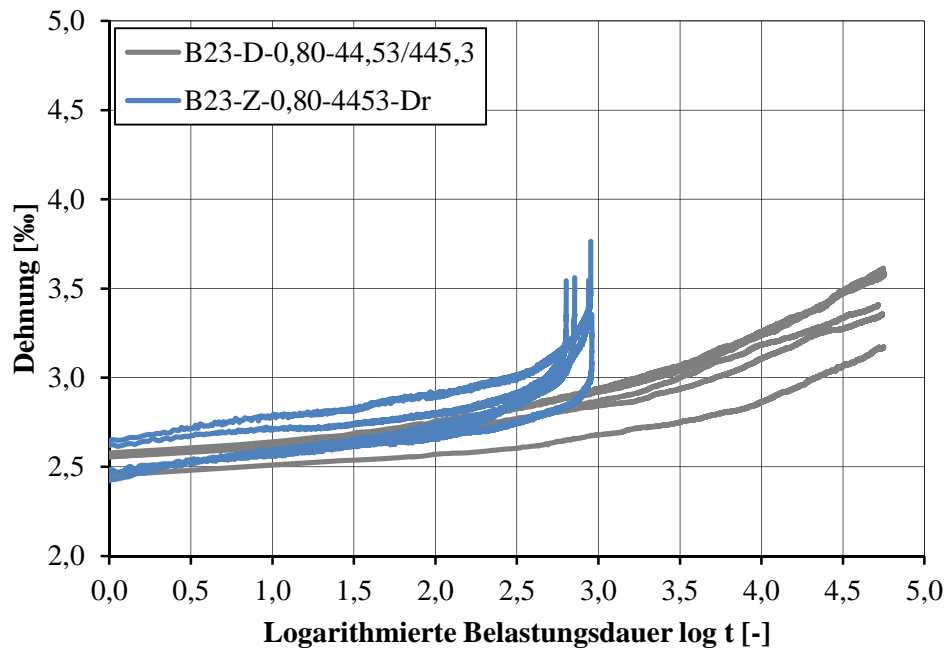


Abbildung A 5.9: Vergleich der Dehnungsentwicklungen bei zyklischer Beanspruchung mit $S_0 = 0,80$, $f_p = 9,76$ Hz, $\dot{k} = 4453$ kN \cdot s $^{-1}$ und bei Dauerstandbeanspruchung mit $S_D = 0,80$ (Darstellung über der logarithmierten Belastungsdauer)

Charge	n	$\log \bar{\epsilon}_{O,t}^{II}, \log \bar{\epsilon}_{D,t}^{II}$		$\log t_U$	
		\bar{x}	s	\bar{x}	s
	[-]	[-]	[-]	[s]	[s]
B23-Z-0,90-445,3-Dr	6	-5,92	0,11	2,55	0,09
B23-Z-0,80-445,3-Dr	6	-6,92	0,11	3,63	0,08
B23-Z-0,80-4453-Dr	5	-6,27	0,13	2,90	0,07
B23-D-0,90-44,5/445,3	6	-6,73	0,50	3,39	0,57

Tabelle A 5.2: Mittelwert und Standardabweichung der logarithmierten Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase und der logarithmierten Belastungsdauer bis zum Versagen

A-5.3 Approximation des Frequenzeinflusses durch die Berücksichtigung der Druckfestigkeitssteigerung

VB	Versuchsserie	f_{cm} [N/mm ²]	\dot{k} [kN·s ⁻¹]	$f_{cm,v}$ [N/mm ²]	$S_{O,v} : S_{U,v}$ [-]
E2	B12-Z-0,80-1,0-Sin	114,4	487,8	133,2*	0,69 : 0,04
	B12-Z-0,95-0,1-Sin	114,4	58,3	126,7*	0,86 : 0,05
	B12-Z-0,90-0,1-Sin	114,4	55,3	126,6*	0,81 : 0,05
	B12-Z-0,80-0,1-Sin	114,4	48,8	126,2*	0,72 : 0,05
	B13-Z-0,80-10,0-Sin (A)	103,6	4261,6	124,2*	0,67 : 0,04
	B13-Z-0,80-10,0-Sin	103,6	4261,6	124,2*	0,67 : 0,04
	B13-Z-0,80-1,0-Sin	103,6	426,2	118,6*	0,70 : 0,04
	B14-Z-0,95-1,0-Sin	102,0	507,1	123,9*	0,78 : 0,04
	B14-Z-0,90-1,0-Sin	102,0	478,9	123,7*	0,74 : 0,04
	B14-Z-0,80-1,0-Sin	102,0	422,6	123,3*	0,66 : 0,04
E4	B21-Z-0,80-1,0-Sin	109,0	445,3	122,2	0,71 : 0,04
	B21-Z-0,80-0,1-Sin	109,0	44,5	118,9	0,73 : 0,05
	B21-Z-0,80-1,0-Dr	109,0	445,3	122,2	0,71 : 0,04
	B21-Z-0,80-0,1-Dr	109,0	44,5	118,9	0,73 : 0,05
	B22-Z-0,90-0,89-Sin	108,0	445,3	125,3	0,78 : 0,04
	B22-Z-0,90-0,09-Sin	108,0	44,5	121,4	0,80 : 0,04
	B22-Z-0,90-0,89-Dr	108,0	445,3	125,3	0,78 : 0,04
	B22-Z-0,90-0,09-Dr	108,0	44,5	121,4	0,80 : 0,04
	B23-Z-0,90-0,86-Dr	111,8	445,3	129,5	0,78 : 0,04
	B23-Z-0,80-0,98-Dr	111,8	445,3	129,5	0,69 : 0,04
	B23-Z-0,80-9,76-Dr	111,8	4453,0	136,2*	0,66 : 0,04
* Druckfestigkeit berechnet		A: Aufspannen der Amplitude			

Tabelle A 5.3: Erhöhte Druckfestigkeiten und umgerechnete Beanspruchungsniveaus der zyklischen Beanspruchungen

Regressionsgeraden der Versuche mit dreiecksförmiger Belastung

Bei Berücksichtigung der ursprünglichen Beanspruchungsniveaus:

$$f_p = 0,1 \text{ Hz: } \log N_f = -9,329 \cdot S_o + 10,646 \quad r^2 = 0,571 \quad n = 13 \quad (\text{A } 5.1)$$

$$f_p = 1,0 \text{ Hz: } \log N_f = -10,979 \cdot S_o + 12,442 \quad r^2 = 0,879 \quad n = 13 \quad (\text{A } 5.2)$$

Bei Berücksichtigung der umgerechneten Beanspruchungsniveaus:

$$f_p = 0,1 \text{ Hz: } \log N_f = -13,237 \cdot S_{O,v} + 12,911 \quad r^2 = 0,571 \quad n = 13 \quad (\text{A } 5.3)$$

$$f_p = 1,0 \text{ Hz: } \log N_f = -15,684 \cdot S_{O,v} + 14,795 \quad r^2 = 0,879 \quad n = 13 \quad (\text{A } 5.4)$$

Regressionsgeraden der Versuche mit sinusförmiger Belastung

Bei Berücksichtigung der ursprünglichen Beanspruchungsniveaus:

$$f_p = 0,1 \text{ Hz: } \log N_f = -8,668 \cdot S_o + 9,647 \quad r^2 = 0,673 \quad n = 13 \quad (\text{A } 5.5)$$

$$f_p = 1,0 \text{ Hz: } \log N_f = -12,954 \cdot S_o + 13,735 \quad r^2 = 0,885 \quad n = 14 \quad (\text{A } 5.6)$$

Bei Berücksichtigung der umgerechneten Beanspruchungsniveaus:

$$f_p = 0,1 \text{ Hz: } \log N_f = -12,383 \cdot S_{O,v} + 11,752 \quad r^2 = 0,673 \quad n = 13 \quad (\text{A } 5.7)$$

$$f_p = 1,0 \text{ Hz: } \log N_f = -18,467 \cdot S_{O,v} + 16,481 \quad r^2 = 0,886 \quad n = 14 \quad (\text{A } 5.8)$$

Beruflicher Werdegang

- 2006 – 2007: Ingenieurin bei der Böger + Jäckle Gesellschaft Beratender Ingenieure mbH & Co. KG, Henstedt-Ulzburg
- 2007 – 2010: Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover
- 2010 – 2014: Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover
- Seit 2014: Akademische Rätin am Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover

Berichte aus dem Institut für Baustoffe

Bisher in dieser Reihe erschienene Hefte:

- Heft 1: Thomas Freimann: „Einfluß von Steinkohlenflugasche auf das rheologische Verhalten von Zementleimen und -mörteln“, 2002.
- Heft 2: Susanne Thoke-Weidlich: „Alkaliionendiffusion in carbonatisierte und nicht carbonatisierte Betone“, 2002
- Heft 3: Lasse Petersen: „Einfluss baustofflicher Schädigungsprozesse auf das Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen“, 2003
- Heft 4: Holger Höveling: „Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB)“, 2006
- Heft 5: Jens Uwe Pott: „Entwicklungsstrategien für zementgebundene Schäume“, 2006
- Heft 6: Steffen Anders: „Betontechnologische Einflüsse auf das Tragverhalten von Grouted Joints“, 2008
- Heft 7: Maik Wefer: „Materialverhalten und Bemessungswerte von ultrahochfestem Beton unter einaxialer Ermüdungsbeanspruchung“, 2010
- Heft 8: Fongjan Yirasit: „Chemical, Mechanical and Microstructural Properties of Alkali-Activated Cement“, 2010
- Sonderheft 2. Betonfachtagung Nord – Sichtbeton, 2010
- Heft 9: Ludger Lohaus; Thomas Steinborn: „Fortschritte in der Baustofftechnik: Festschrift 10 Jahre Institut für Baustoffe“, Leibniz Universität Hannover und 70 Jahre Harald Schorn, 2011
- Sonderheft 4. Betonfachtagung Nord – WU-Konstruktionen als Regel- und Sonderbauweise, 2012
- Heft 10: Nick Lindschulte: „Drucktragverhalten von Rohren aus Ultrahochfestem Beton mit Stahlblechummantelung“, 2013
- Heft 11: Karen Fischer: „Betontechnische Einflüsse auf das Erscheinungsbild von Sichtbetonflächen bei Zementleimleckagen“, 2014
- Heft 12: Thomas Steinborn (Hrsg.): „Festschrift Ludger Lohaus zur Vollendung des sechzigsten Lebensjahres“, 2014
- Heft 13: Nadja Oneschkow: „Analyse des Ermüdungsverhaltens von Beton anhand der Dehnungsentwicklung“, 2014

Mitteilungen des Instituts für Baustoffkunde und Materialprüfung

Die Hefte der bis 1995 laufenden Schriftenreihe „Mitteilungen des Instituts für Baustoffkunde und Materialprüfung“ können ebenfalls über das Institut für Baustoffe der Leibniz Universität Hannover bezogen werden.

Institut für Baustoffe

Leibniz Universität Hannover

Appelstraße 9A

30167 Hannover

Tel.: 0511 / 762-3722

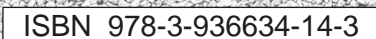
Fax: 0511 / 762-4736

<http://www.baustoff.uni-hannover.de>

Die Autorin:

Nadja Oneschkow, Jahrgang 1981, studierte von 2000-2006 Bauingenieurwesen an der Leibniz Universität Hannover. In der Zeit von 2006-2007 war sie bei der Böger + Jäckle Gesellschaft Beratender Ingenieure mbH & Co. KG in Henstedt-Ulzburg als Ingenieurin tätig. Von 2007-2010 arbeitete sie am Institut für Massivbau und von 2010-2014 am Institut für Baustoffe der Leibniz Universität Hannover als wissenschaftliche Mitarbeiterin. In dieser Zeit beschäftigte sie sich u. a. mit dem ein- und mehraxialen Ermüdungsverhalten hochfester Betone sowie mit dem einaxialen Ermüdungsverhalten normalfester und ultra-hochfester Betone. Darüber hinaus arbeitete sie bei der Weiterentwicklung der Normung im Bereich der Betonermüdung mit.

Dieses Buch stellt die genehmigte Dissertation der Autorin dar.



ISBN 978-3-936634-14-3