

Zum Ermüdungsverhalten von Beton

vorgelegt von
RALPH HOHBERG
aus Berlin

Von
Fakultät VI
Bauingenieurwesen u. Angewandte Geowissenschaften
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 22.03.2004

Berlin 2004
D 83

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stavros Savidis

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier

Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Matthias Maultzsch

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	III
BEZEICHNUNGEN	IV
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 EINLEITUNG	1
1.2 FRAGESTELLUNG UND ZIELSETZUNG	1
1.3 VORGEHENSWEISE	2
2 GRUNDLAGEN	3
2.1 ALLGEMEIN	3
2.2 WERKSTOFFVERHALTEN VON BETON	3
2.3 BETON UNTER KURZZEITIGER DRUCKBEANSPRUCHUNG	4
2.4 KRITISCHE SPANNUNG	4
2.5 BETON UNTER LANGZEITBEANSPRUCHUNG	5
2.6 DAUERSCHWINGVERSUCHE	5
3 STAND DER ERKENNTNISSE	6
3.1 ERMÜDUNGSVERHALTEN VON BETON	6
3.2 UNTERSUCHUNGEN UNTER DRUCKSCHWELLBEANSPRUCHUNG	6
3.3 WÖHLERVERSUCHE	8
3.4 "DAUERSCHWINGFESTIGKEIT" VON BETON	8
3.5 SCHÄDIGUNGSPHASEN DER ERMÜDUNG	8
3.6 EINFLÜSSE AUF DIE LEBENSDAUER	9
3.7 KRÜMMUNGSUMKEHR DER SPANNUNGS-DEHNUNGSLINIE	10
3.8 MODELLVORSTELLUNG DER BETONERMÜDUNG	10
3.9 LEBENSDAUER-BEZIEHUNGEN	11
3.9.1 Spannungs-Lebensdauer-Beziehung	11
3.9.2 Verformungsgeschwindigkeit-Lebensdauer-Beziehung	11
3.10 SCHADENSAKKUMULATIONSHYPOTHESEN	12
3.11 RISSBILDUNGSMECHANISMUS	13
3.11.1 Rissentstehung im unbelasteten Beton	14
3.11.2 Rissentstehung und -entwicklung bei Druckbeanspruchung	15
3.11.3 Rissentwicklung bei der Betonermüdung	17
3.11.4 Betrachtungen im Zusammenhang mit der Betonermüdung	18
3.12 ALLGEMEINE BETRACHTUNG DES VORHANDENEN WISSENSTANDES	19
4 EIGENE UNTERSUCHUNGEN	20
4.1 VERWENDETE BETONE	20
4.1.1 Betonzusammensetzung	20
4.1.2 Herstellung der Probekörper	20
4.1.3 Frischbetonprüfungen	21
4.1.4 Nachbehandlung und Lagerung	21
4.1.5 Festigkeit und E-Modul	21
4.2 VORVERSUCHE	22
4.2.1 Veränderung der mechanischen Eigenschaften von druckschwellbeanspruchtem Beton	22
4.2.2 Betonsteifigkeit während der Ermüdungsversuche	24
4.2.3 Einfluss der Schwingungsunterbrechung (s-e-Messung)	24
4.2.4 Überlegungen zur Wahl der Prüfmethodik bei Schwingversuchen	25
4.3 VERSUCHSPROGRAMM DER ERMÜDUNGSVERSUCHE	25
4.3.1 Druckschwellversuche	26
4.3.2 Dauerstandversuche	26
4.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	27
4.4.1 Zerstörungsfreie Prüfungen	27
4.4.2 Statische Prüfungen	27
4.4.3 Ermüdungsversuche	27

4.4.4	Ermüdungsversuche mit Ruhephase	28
4.4.5	Dauerstandversuche	28
4.4.6	Zerstörungsfreie Beobachtung der Betonermüdung	29
4.5	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	30
4.5.1	Versuchsergebnisse	30
4.5.1.1	<i>Ermüdungsversuche</i>	30
4.5.1.2	<i>Ermüdungsversuche mit Ruhephase</i>	32
4.5.1.3	<i>Gesamtverformungen bei den Ermüdungsversuchen</i>	32
4.5.1.4	<i>Dauerstandversuche</i>	33
4.5.2	Gesamtverformungen bei der Ermüdung	34
4.5.2.1	<i>Beanspruchungshöhe</i>	34
4.5.2.2	<i>Frequenz</i>	35
4.5.3	Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit	37
4.5.3.1	<i>Beanspruchungshöhe</i>	37
4.5.3.2	<i>Steifigkeit</i>	37
4.5.3.3	<i>Anfangs-Steifigkeit</i>	38
4.5.3.4	<i>Ruhephasen</i>	39
4.5.3.5	<i>Frequenz</i>	40
4.5.3.6	<i>Feuchtigkeitsgehalt im Beton</i>	41
4.5.3.7	<i>Einflüsse auf die Bruchlastspielzahl - Erkenntnis</i>	43
4.5.4	Versagenskriterien	44
4.5.4.1	<i>Beanspruchungshöhe</i>	44
4.5.4.2	<i>Energiebetrachtung</i>	45
4.5.4.3	<i>Steifigkeitsverlust</i>	46
4.5.5	Abschätzung der Bruchlastspielzahl	46
4.5.5.1	<i>Nach Model-Code</i>	47
4.5.5.2	<i>Nach Veritas Regel (Norwegian Code)</i>	48
4.5.5.3	<i>Abschätzung durch Ermüdungsversuche</i>	49
4.5.5.4	<i>Abschätzung durch statische Kennwerte</i>	50
4.5.6	Zerstörungsfreie Beobachtung der Ermüdung	51
4.5.7	Nachweis einer dynamische Vorschädigung	52
4.5.8	Steifigkeitsabnahme bei der Ermüdung	53
4.5.9	Bruchbilder	55
4.5.10	Versagensbetrachtung	55
4.5.11	Ermüdungsfestigkeit von hochfestem Beton und Recyclingbeton	56
4.5.12	Dauerstandversuche	56
5	ZUSAMMENFASSUNG	58
6	AUSBLICK	60
	LITERATUR	61
	ANHANG	66

Vorwort

Den Präsidenten der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) Herrn Prof. Dr. Hennecke und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. H. Czichos, sowie den Leitern der Abteilung VII „Bauwerkssicherheit“, der Fachgruppe VII.1 „Baustoffe“ und des Laboratoriums VII.12 „Festigkeit- und Verformungsverhalten von Baustoffen“ danke ich für die gebotene Möglichkeit zur Durchführung der umfassenden, ausgedehnten Untersuchungen.

Besonderen Dank gebührt den Herren Professoren Dr.-Ing. B. Hillemeier und Dr.-Ing. M. Maultzsch für die wissenschaftliche Betreuung und für zahlreiche wertvolle Hinweise und Ratschläge. Frau Dr. rer. nat. B. Meng danke ich für ihren Einsatz und die fruchtbaren Impulse bei der Fertigstellung.

Herrn Dr.-Ing. H. Winkler bin ich vorrangig für seine wissenschaftliche Betreuung, seinem engagierten Einsatz und der Hilfe bei der Durchführung der Versuche sehr dankbar.

Herrn J. Danßmann und H. Steinke möchte ich für ihren praktischen Einsatz und für nachhaltige Auswertungsarbeit danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Hundt danke ich für seine Zeit und der hilfreichen steten Bereitschaft zur Diskussion.

Meinen Kollegen der Fachgruppe VII.1 gilt mein besonderer Dank für die tatkräftig praktische Unterstützung, die umfangreichen experimentellen Untersuchungen durchzuführen.

Im Speziellen danke ich Herrn M. Koch für seinen Einsatz und seiner steten Diskussionsbereitschaft. Zudem danke ich u.a. genauso weiteren „Leuten“, wie D. Zimon, J. Sichtung und I. Schultz, die tatkräftig, aber auch mit vielen urbaren Diskussionen, kreativen Anregungen und Sonstigem, die Arbeit unterstützten.

Abschließend möchte ich allgemein Herrn J. P. Berger, Frau G. Berger, Herrn Dr.-Ing. F. Reusch, Herrn G. Mellmann und Herrn U. Meinhold danken.

...

Bezeichnungen

Lateinische Grossbuchstaben

A	Fläche	C	Konstante
D	Verformungsmodul, Dämpfungskoeffizient	E	Elastizitätsmodul
F	Kraft allgemein	G	Energie
M	Moment	N	Bruchlastspielzahl
P	Punkt	S	Druckspannungsverhältnis
T	Temperatur, Schwingungsdauer	V	Volumen

Lateinische Kleinbuchstaben und Abkürzungen

a	Beschleunigung	c	Wärmekapazität
f	Baustofffestigkeit, Frequenz	h	Höhe
k	Boltzmann-Konstante	l	Länge
m	Masse	n	Anzahl (Lastwechsel)
s	Strecke	t	Zeitpunkt
v	Querbewegungsgeschwindigkeit	w	wassergelagert, Rissöffnung, Verformung
x	Koordinate		
dyn	dynamisch	stat	statisch
EnI	Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung	jap	Beton mit 8 mm Größtkorn
Post	nach, hinter	Pre	vor
r. F.	relative Feuchtigkeit	rec	Recyclingbeton
s-e	Spannungs-Dehnung	US	Ultraschall-Laufzeitmessung

Griechische Grossbuchstaben

Δ	Differenz	Σ	Summe
\emptyset	Durchmesser		
θ	Benetzungswinkel		

Griechische Kleinbuchstaben

σ	Spannung	ρ	Dichte, Radius
ε	Dehnung	$\dot{\varepsilon}$	Dehnungsgeschwindigkeit
β	Bruchfestigkeit	ω	Wasser-Zement-Wert
η	Zähigkeit	γ	Oberflächen-Energie
ν	Anlauffrequenz		

Allgemeine Indizes

0	Elementar, Anfang	a	Aktivierung
b	Bruch	c	Beton
i	Zähler	m	Mittelwert
n	Anzahl	p	Pivot
R	Roh(-dichte)		

Abgeleitete Indizes

bl	bleibend	f	Fließ (verzögert bleibend)
el	elastisch	kin	kinetisch
K	Kriechen	L	Luft
krit	kritisch	max	maximal
M	Mittel	O	Ober
min	minimal	Res	Resultierende
r	rechnerisch	S	Feuchte
rest	Rest	stat	statisch
sec	secondary	U	unter
T	Wärme	vi	viskos
vel	verzögert elastisch	Z	Zug
W	Wasser		

1 Einführung

1.1 Einleitung

Unter dem Ermüdungsverhalten von Werkstoffen wird die Abnahme der Leistungsfähigkeit verstanden, die durch zyklisch-mechanische Beanspruchungen verursacht wird.

Die wissenschaftliche Betrachtung der Ermüdung begann im frühen 19. Jahrhundert. *ALBERT* [2] befasste sich mit Versagensfällen von Förderbändern. Einige Jahre später veranlassten auftretende Achsbrüche bei Eisenbahnen und Postkutschen *WÖHLER* [128][129][130][131] die Ermüdungsvorgänge bei metallischen Werkstoffen systematisch zu erforschen. Ergebnis dieser Ermüdungsuntersuchungen waren die sogenannten „Wöhler Gesetze für metallische Werkstoffe“, die im Jahr 1870 veröffentlicht wurden. Mitte des 20. Jahrhunderts wurde die Forschung zum Thema der Ermüdung von metallischen Werkstoffen vorrangig durch das Interesse der Flugzeug- und Autoindustrie gefördert und weiter vorangetrieben.

Die Untersuchungen an metallischen Werkstoffen waren Grundlage späterer Ermüdungsversuche an Beton. *VAN ORNUM* [117] beschrieb im Jahre 1907 das Verhalten von zyklisch beanspruchtem unbewehrtem Beton, Stahlbetonbalken und Ausziehkörpern. Das Interesse am Ermüdungsverhalten von Beton entstand durch den Einsatz von zyklisch beanspruchten Bauteilen, wie z. B. den Bau von Eisenbahn- und Straßenbrücken aus Stahlbeton, Off-Shore-Bauwerken und Autobahnen. Derartige Betonkonstruktionen oder Betonbauteile unterliegen nicht nur statischen Belastungen, sondern auch hohen dynamischen Beanspruchungen durch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, welche beispielsweise durch Wellenschlag, Windlast, bewegliche Verkehrslasten, Feder- und Stoßbeanspruchungen hervorgerufen werden. Die Beanspruchungsfrequenzen können zum Beispiel an Eisenbahnbrücken eine Höhe von bis zu 80 Hz erreichen.

Bisher sind nur wenige direkte Versagensfälle von Betontragwerken durch eindeutige Ermüdungseinwirkung bekannt geworden. Dies bedeutet aber nicht, dass es nicht eine größere Anzahl von Ermüdungsschäden an Betontragwerken gibt. Sie sind möglicherweise nur nicht als solche erkannt worden, da sich Rissbildungen infolge statischer Belastung und Ermüdung auf den ersten Blick nicht von einander unterscheiden lassen.

Die vorrangigen Ursachen für ein Anwachsen der Ermüdungsgefahr und der aus der dynamischen Beanspruchung resultierenden Betonschädigung sind die zunehmende Tragfähigkeitsausnutzung der Baustoffe, schlankere Bauteile aufgrund verfeinerter Bemessungsverfahren und eine Veränderung der Lasten durch höhere Geschwindigkeiten und die Zunahme des Verkehrsvolumens. Diese Art von Anforderungen bedarf natürlich auch immer präziserer Kenntnisse über den Werkstoff in bezug auf Festigkeit, Verformbarkeit und Ermüdungswiderstandsfähigkeit. Die Arbeit von *MÜLLER*, *KEINTZEL* und *CHARLIER* [67] gibt einen Überblick über die Einwirkungen von dynamischen Beanspruchungen auf Bauwerke und zeigt auf, dass über 60 % aller mechanischen Versagensfälle durch Ermüdung verursacht werden [70]. Die Entstehung und Ausbreitung von Rissen im Beton, d.h. die Schädigung, wird durch eine periodisch wiederkehrende Energiezufuhr verursacht und gefördert. Zyklisch-mechanische Beanspruchungen führen im Vergleich zu statischen Beanspruchungen, bei gleicher maximaler Beanspruchungshöhe, zu einer schnelleren Werkstoffermüdung und zu einem vorzeitigen Versagen des Werkstoffs. In der Regel ist dadurch die maximal ertragbare Spannungsamplitude bei dynamischen Beanspruchungen weitaus kleiner als die Bruchfestigkeit bei statischer Beanspruchung. Somit ist für eine sichere Bemessung derartig beanspruchter Bauwerke die Kenntnis des Ermüdungsverhaltens des Werkstoffs Beton unverzichtbar.

1.2 Fragestellung und Zielsetzung

Die Schädigung infolge Ermüdung ist ein schleichender Prozess, der sich über einen weiten Zeitraum erstrecken kann. Die Sicherheit gegen Ermüdungsversagen an bestehenden Tragwerken kann mit den geltenden Normvorschriften nur unzureichend nachgewiesen werden. Dabei ist eine sichere

Berücksichtigung zyklisch-mechanischer Einwirkungen besonders bei Bauwerken mit hohen Verkehrslasten, wie beispielsweise an Brücken oder der „Festen Fahrbahn“ im Eisenbahnverkehr erforderlich. Die Nutzungsänderung oder die Klärung entstandener Zweifel an der Sicherheit eines solchen dynamisch beanspruchten Tragwerks kann nicht ohne weitergehende Untersuchungen sicher beurteilt werden. Es fehlen Grundlagen, welche dynamische Beanspruchungen von Betonbauwerken bewertbar machen. Es stellt sich daher die Frage nach einer definierten Kennwertermittlung der Ermüdung, der Darstellung der Ermüdungswiderstandsfähigkeit eines Baustoffs, der Höhe der auftretenden Schädigung und der resultierenden Nutzungsdauer dynamisch beanspruchter Bauwerke.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Methoden aufzuzeigen, welche eine Abschätzung bzw. Beurteilung der Ermüdungswiderstandsfähigkeit und Lebensdauer von Beton ermöglichen. Es soll untersucht werden, inwieweit sich die Ermüdung durch die Veränderung der mechanischen Betoneigenschaften erkennen lässt und ob die Festigkeit und/oder das Verformungsverhalten zuverlässige Indikatoren darstellen. Darüber hinaus soll eine Methode entwickelt werden, mit deren Hilfe sich die Art der Vorbeanspruchung (statische oder zyklisch-mechanische Beanspruchung) ableiten lässt.

Die Arbeit soll zudem einen ergänzenden Beitrag zum Ermüdungsverhalten von Beton und dessen Einflussfaktoren liefern. Es soll insbesondere geklärt werden:

- wie sich die Haupteinflussfaktoren der Ermüdung, wie Frequenz, Beanspruchungshöhe und Ruhephasen, auf das Verformungsverhalten und die Lebensdauer auswirken;
- wie der Ermüdungsvorgang bzw. die Ermüdungswiderstandsfähigkeit eines Betons erfasst werden kann und ob das Ermüdungsverhalten mit allgemeingültigen komplexen Modellen oder mit Kennwerten von vorangegangenen Werkstoffprüfungen charakterisiert werden sollte.

Neben den normalfesten Betonen werden spezielle Betone, z.B. Recyclingbeton, welcher einen hohen Matrixanteil aufweist, oder hochfester Beton betrachtet. Das dynamische Werkstoffverhalten ist bei diesen Betonen noch weitgehend unbekannt. Eine Einbeziehung in das Versuchsprogramm erschien daher notwendig.

1.3 Vorgehensweise

Ermüdung ist ein umfassender Begriff. Ermüdungsversuche können auf unterschiedliche Art und Weise durchgeführt werden. Die Arbeit konzentriert sich auf den abgegrenzten Bereich der statischen Druckversuche und zyklisch-mechanischen Druckschwellversuche. Den oft mit der Betonermüdung in Verbindung gebrachten Rissfortschrittsbetrachtungen der Bruchmechanik wird nicht nachgegangen.

Nach der Klärung, welcher mechanische Kennwert auf den Schädigungsprozess am stärksten reagiert, wurden die Ermüdungsversuche darauf ausgerichtet. Während der Ermüdungsversuche wurden die Verformungen und der Verlauf der Betonsteifigkeit aufgezeichnet. Die wesentlichen Einflussfaktoren, wie beispielsweise Frequenz, Beanspruchungshöhe, Betonart/-festigkeitsklasse, Betonzusammensetzung und Feuchtigkeitsgehalt wurden bei den Ermüdungsversuchen variiert.

In weiteren Versuchsreihen wurden an dauerschwing-, dauerstands- und zuvor nicht beanspruchten Probekörpern statische Bruchversuche mit gleichzeitiger Ultraschall-Laufzeitmessung durchgeführt, um die jeweiligen Änderungen der mechanischen Eigenschaften aufzuzeigen.

Um weiterführend die Ermüdungsvorgänge am Bauwerk mobil beobachten zu können, wurde als Zusatz in der Arbeit überprüft, inwieweit sich die Ermüdung auch über zerstörungsfreie Prüfverfahren, speziell mit Hilfe der Ultraschall-Laufzeitmessung, erfassen lässt.

2 Grundlagen

2.1 Allgemein

Das Ermüdungsverhalten eines Betons wird durch die Betonzusammensetzung und Betonrezeptur beeinflusst. Grundsätzlich muss bei der baustoffkundlichen Diskussion berücksichtigt werden, dass Beton ein Mehrkomponenten-Baustoff ist. Entsprechend müssen auch das Verbundverhalten und das jeweilige mechanische Verhalten der Einzelkomponenten, der Zuschlag und der zwischen den Körnern als spannungsübertragene Matrix wirkende Zementstein betrachtet werden.

Maßgebende Einflussfaktoren auf das viskose Verhalten vom Zementstein sind:

- der Wasser-Zement-Wert als wichtigster Einflussfaktor;
- der Zementtyp mit weniger Einfluss;
- die Art, Festigkeit und Sieblinie des Zuschlags.

2.2 Werkstoffverhalten von Beton

Viele Theorien im Bereich der Metall- und Werkstoffkunde gehen davon aus, dass bleibende Verformungen von einer thermisch aktivierten und spannungsinduzierten Hindernisüberwindung hervorgerufen werden [120]. Ein Bruchvorgang wird in einer atomaren Größenordnung im allgemeinen thermodynamisch durch das Aufbringen äußerer Spannung aktiviert, welche das Potentialgebirge verzerrt und eine Relativbewegung zwischen den Werkstoffpartikeln hervorruft. Die Gesamtverformung von Beton setzt sich aus mehreren reversibeln, irreversibeln, spannungsunabhängigen und spannungsabhängigen Formänderungen zusammen. *KORDINA* [56] hat 1958 versucht, diese nach Ursache und Wirkungsmechanismus gegliedert darzustellen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Einteilung der Formänderungen nach [56]

	Spannungsabhängig		Nicht spannungsabhängig
	Nicht zeitabhängig	Zeitabhängig	
Umkehrbar reversibel	elastisch ϵ_{el}	Verzögert elastisch ϵ_{vel}	Wärmedehnung ϵ_T Feuchtedehnung ϵ_S
Nicht umkehrbar irreversibel	Setzdehnung ϵ_{bl} (bleibend)	Fließdehnung ϵ_f (verzögert bleibend)	Chemische Dehnung

Spannungsabhängige Formänderungen können sofort oder erst verzögert während einer kurzen oder langen Belastungsdauer auftreten. Sie können umkehrbar oder nicht umkehrbar sein. Die elastischen Anteile einer Deformation gehen nach Entlastung vollständig zurück. Plastische Anteile der Formänderung bleiben nach der Entlastung bestehen und verursachen Eigenspannungen im Gefüge.

Infolge der viskoelastischen Eigenschaften des Betons ergibt sich bei Beanspruchung - je nach Belastungszeit bzw. Belastungsgeschwindigkeit $\dot{\sigma}$ - eine mehr oder weniger stark gekrümmte Spannungs-Dehnungslinie (ABBILDUNG 1). Ein gerader Verlauf würde bei einer plötzlichen, unendlich schnellen Belastung entstehen, denn eine Steigerung der Belastungsgeschwindigkeit $\dot{\sigma}$ hat eine Verringerung der plastischen Verformungen und damit eine Erhöhung der Steigung der Spannungs-Dehnungslinie zur Folge. Die Verformbarkeit sinkt, während das Festigkeitsniveau ansteigt [124].

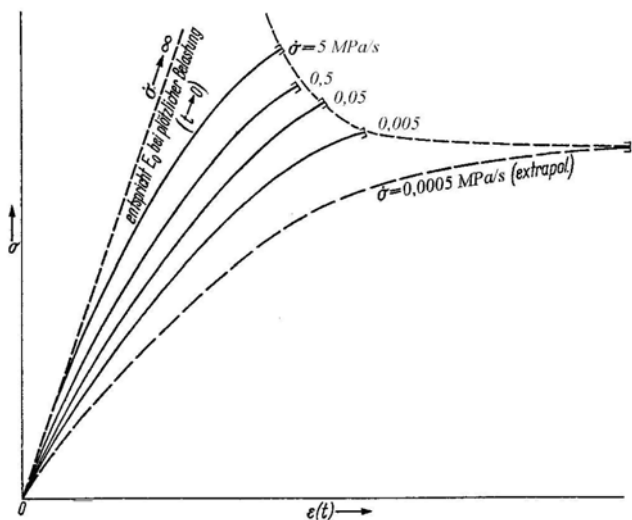


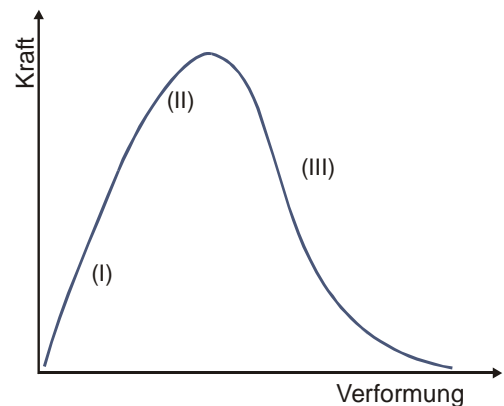
Abbildung 1: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit $\dot{\sigma}$ auf den Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie [126]

Bei einer Beschreibung des Werkstoffverhaltens unter zyklisch-mechanischen Einwirkungen ist die Zeitabhängigkeit der Spannungs-Dehnungslinie von Beton zu berücksichtigen.

2.3 Beton unter kurzzeitiger Druckbeanspruchung

Wird ein statischer Bruchversuch mit Verformungsmessung durchgeführt, erhält man die in *ABBILDUNG 2* schematisch dargestellte Spannungs-Dehnungslinie. Bei geringer Beanspruchung verhält sich Beton nahezu linear-elastisch (I). Mit steigender Spannung fällt die Betonsteifigkeit bis zur Maximalkraft ab (II). Bei verformungsgeregelten Druckversuchen sind nach dem Überschreiten der Bruchdehnung Stauchungsentfestigungen zu beobachten (III).

Vertikal Risse an der Betonoberfläche sind vorwiegend erst nach dem Überschreiten der Druckfestigkeit erkennbar.



2.4 Kritische Spannung

Mit zunehmender Druckspannung wird ab einem Punkt ein instabiler Zustand des Betongefüges erreicht, ab dem die Steigung der Volumenänderungskurve nicht mehr ab-, sondern wieder zunimmt (*ABBILDUNG 3*). Die Risse in der Verbundzone Matrix-Zuschlagkorn werden durch Risse in der Matrix verbunden. Das Volumen, welches sich durch die Längsstauchung verringert, wächst nun durch die steigende Querdehnung wieder an. Dieser Punkt der Querdehnungserhöhung, wird als kritische Spannung, „Diskontinuitätspunkt“ oder „lower limit of structural loosening“ bezeichnet und beschreibt in etwa die Dauerstandfestigkeit. Diese kritische Spannung liegt je nach Beton zwischen 65 % und 90 % der Bruchfestigkeit. Unterhalb dieses Punktes ist ein Versagen infolge fehlender durchgehender Risse nicht möglich.

Abbildung 2: Kraft-Verformungskurve eines verformungsgeregelten Bruchversuches

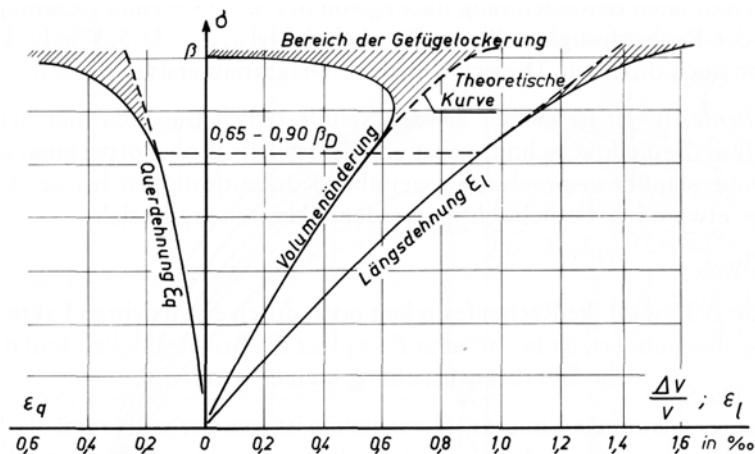


Abbildung 3: Längen- und Volumenänderung bei Druckbeanspruchung [125]

2.5 Beton unter Langzeitbeanspruchung

Bei äußerer angreifender Beanspruchung entstehen zunächst elastische und dann bleibende Verformungen. Eine dauerhaft einwirkende Druckbelastung verursacht eine zeitlich anwachsende bleibende Verkürzung des Betons. Diese lastabhängige Eigenschaft von Beton wurde schon 1905 von *WAGNER* beschrieben und als „Kriechen“ (engl.: „creep“) bezeichnet.

Das Kriechen des Zementsteines hängt weitestgehend vom Wassergehalt des Gels ab. Ein langzeitbeanspruchter feuchter Zementstein kriecht über mehrere Jahre und ein total trockener Zementstein praktisch nicht.

Die Mechanismen, die Einflüsse und die Ursachen des Kriechens sind aufgrund der Komplexität immer noch nicht vollkommen geklärt. Man vermutet, dass der Kriechvorgang durch die Lageveränderung der zuvor in Ruhestellung befindlichen festen Teilchen und vor allem durch die Wasserverdrängung im Gelporenbereich entsteht [39].

Der Kriechverlauf kann in drei Phasen eingeteilt werden: In der ersten Phase nehmen die Verformungen erst stark und in der zweiten Phase schwach zu. Wird die Langzeitbeanspruchung sehr hoch gewählt (oberhalb der kritischen Spannung), so ist es möglich auch die dritte Phase zu erreichen, in der die Verformungen wieder stark zunehmen und zum Bruch führen (*SIEHE AUCH KAPITEL 3.5, SEITE 8*). Bei geringerer Dauerlast (unterhalb der kritischen Spannung), verringern sich mit zunehmender Beanspruchungsdauer die Kriechverformungsänderungen. Es ist aber noch nicht erwiesen, ob ein Endkriechmaß existiert und das Kriechmaß somit einen asymptotischen Grenzwert erreicht.

2.6 Dauerschwingversuche

Die Belastbarkeit zyklisch-mechanisch beanspruchter Werkstoffe wird meistens in sogenannten Wöhlerlinien dargestellt.

In einer Wöhlerlinie, wie sie in der *ABBILDUNG 4* schematisch für Stahl dargestellt ist, sind Spannungsamplitude σ_A und die Schwingungszahl N , die zum Bruch führt, gegeneinander aufgetragen. Oberspannung σ_o , Unterspannung σ_u oder Mittelspannung σ_M sowie Frequenz sind dabei konstant.

Hohe Belastungen führen schon nach wenigen Lastwechseln zum Versagen des Werkstoffs, der sogenannten Kurzzeitfestigkeit (low-cycle-fatigue). Werden die Spannungsamplituden geringer, so steigt die Anzahl der aufzubringenden Schwingungen bis zum Versagen. Dieser Bereich heißt Zeitfestigkeit. Dauerschwingfest ist ein Werkstoff erst, wenn er ab einer bestimmten Spannungsamplitude unendlich vielen Schwingungen ohne Schaden standhält.

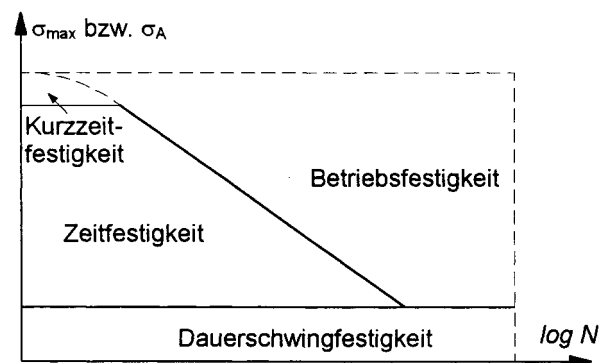


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Wöhlerlinie für metallische Werkstoffe [8]

3 Stand der Erkenntnisse

3.1 Ermüdungsverhalten von Beton

Die Ermüdung von Beton wurde bislang hauptsächlich unter Laborbedingungen auf empirischer Basis erforscht. Die Art der Ermüdungsbeanspruchung in zahlreichen Veröffentlichungen variiert zwischen Zug-, Druck-, Biegezug-, Biegedruck- und Spaltzugbeanspruchungen. *HILSDORF* et. al [44], *MILLS & DAWSON* [65], *EWING* [28], *NORDBY* [72], *MURDOCK* [69], *SORETZ* [107], *FREITAG* [30], *BISCHOFF & PERRY* [11] und *CEB* [16] stellten u. a. in ihren Arbeiten eine Übersicht über das Ermüdungsverhalten von Beton zusammen.

Weitergehende experimentelle Vorgehensweisen zur Ermüdungserfassung bzw. -ermittlung, wie die Sichtbarmachung von Rissen [25][100][119], die Erfassung von Gefügeänderungen mit Hilfe von Röntgenstrahlung [105], den Einsatz von Ultraschallverfahren [82][122] und der Schallemissionsanalyse (SEA) [9][22][109] wurden in der Literatur beschrieben.

3.2 Untersuchungen unter Druckschwellbeanspruchung

Verschiedene Veröffentlichungen befassten sich in Einstufenversuchen und in neuerer Zeit auch in Mehrstufenversuchen (Variation der Schwingbeanspruchung) [54] mit Dauerschwingfestigkeit- und Verformungsuntersuchungen von sinusförmig druckschwellbeanspruchtem normalfestem Beton und Zementstein. Betrachtet wurde dabei vorwiegend die Zunahme der plastischen Verformungen, der Flächeninhalt der Hystereseschleifen zwischen Be- und Entlastungsast und die Verläufe der Spannungs-Dehnungslinien [4][6][17][24][32][46][63][64][80][97][108]. In allen diesen Versuchsreihen, bei denen die Bruchlastspielzahl in der Regel unter 10^7 Beanspruchungszyklen lag, ist es nicht gelungen, eine Dauerschwingfestigkeit zu finden.

Die gesichteten experimentellen Arbeiten am druckschwellbeanspruchtem Beton weisen infolge unterschiedlicher Randbedingungen (unterschiedliche Versuchsbedingungen, Betonzusammensetzung, Belastungsfrequenzen, Probekörpergröße und -gestalt) eine Vielzahl von zum Teil nicht untereinander vergleichbaren Ergebnissen auf.

GAEDES [32] Untersuchungen zeigten keinen systematischen Einfluss der Betonfestigkeitsklasse (B 15, B 25, B 45) auf die Lebensdauer. Er beobachtete jedoch, dass bleibende Verformungen auch bei Lastwechseln bis zu $13 \cdot 10^6$ Zyklen weiterhin zunehmen. Der zum Versagen führende Verformungsverlauf konnte in drei charakteristische Phasen eingeteilt werden. Nach einer Zusammenstellung von *GAEDE* [32] stimmen seine Bruchlastspielzahlergebnisse, und die von *KOZAK* [57] und *GREY, McLAUGHIN, ANTRIM* [38], trotz unterschiedlicher Versuchsparameter, gut überein. Dies lässt erkennen, dass die unterschiedliche Versuchsdurchführung der einzelnen Versuchsprogramme keinen bzw. nur einen geringen Einfluss auf die jeweils ermittelte Lebensdauer haben. Betonqualität und die Wahl des Zuschlages lassen dabei nur einen untergeordneten Einfluss erkennen.

GRAF UND BRENNER [37] führten Untersuchungen an einer geringen Anzahl von Probekörpern durch. Sie variierten dabei Betonfestigkeit (Prismendruckfestigkeit 12 MPa bis 30 MPa), Zementgehalt, Sieblinie, Zuschlagstoffart (Splitt bzw. Kies), Konsistenz, Lastspielzahl (0,17 Hz bis 8,3 Hz.) und das Verhältnis σ_u/σ_o . Die Lebensdauer nahm hierbei mit steigender Prismendruckfestigkeit und mit zunehmendem Zementgehalt leicht ab, sowie mit steigender Frequenz leicht zu. Sieblinie, Art des Zuschlages und Konsistenzunterschiede hatten nur einen marginalen Einfluss.

Die Untersuchungen von *HOLMEN* [45], *MEHMEL UND KERN* [63][64] befassten sich nur am Rande mit der Dauerschwingfestigkeit. Sie konzentrierten sich vorwiegend auf die während eines Dauerschwingversuches auftretenden plastischen und elastischen Verformungen. Die Untersuchungen ergaben, dass unter gleichen Beanspruchungsverhältnissen die Betonfestigkeit (B 25 und B 45) keinen Einfluss hat, aber die Erhöhung des Zementgehaltes bei gleicher Betonfestigkeitsklasse eine Steigerung der Lebensdauer hervorruft.

KLAUSEN [54] untersuchte die Ermüdungsfestigkeit des Betons bei zentrischer Druckschwellbeanspruchung zwischen konstanten Belastungsgrenzen. Dies zeigte, dass die Wahl der Unterspannung

für den Verlauf der „Wöhlerlinie“ bedeutsam ist. Mit abnehmender Unterspannung wird der entstehende Verlauf der „Wöhlerlinien“ steiler und die Bruchlastspielzahl nimmt ab.

Nach *BENNETT UND MUIR* [10] ergibt die Verwendung von unterschiedlichem Größtkorn (9,5 mm und 19 mm) keine abweichenden Ergebnisse. Die höheren Druckfestigkeiten (Prismendruckfestigkeit 42 MPa bis 60 MPa) im Vergleich zu *GAEDE* verursachten eine leichte Verringerung der Bruchlastspielzahlen.

ASSIMACOPOULOS, WARNER UND EKBERG [4] stellten fest, dass sich durch hohe Belastungsgeschwindigkeiten die Betonprobekörper merkbar erwärmten und unterschiedliche Belastungsgeschwindigkeiten keinen Einfluss auf die Lebensdauer haben.

LE CAMUS [60] Versuchsreihen ergaben, dass bei gleichen Randbedingungen das Betonalter bei Versuchsbeginn für die Lebensdauer keine merkbare Rolle spielte. Die hier untersuchten Probekörper waren 15 Tage, zwei Monate, ein, drei und sechs Jahre alt.

ANTRIUM UND MCLAUGHIN [3] zeigten, dass der Luftporengehalt im Beton die Lebensdauer kaum beeinflusst.

REINHARDT ET AL [84] zeigten, dass mit wachsender Schwingungsbreite σ_u/β_p die Bruchlastspielzahl N erst leicht ansteigt und dann auf ein Bruchlastspielzahlniveau abfällt. Bei geringerer Oberspannung und gleicher Frequenz nimmt die Bruchlastspielzahl N zu (ABBILDUNG 5).

ZHANG ET AL [133], *CORNELISSEN* und *REINHARDT* [20] zeigten, dass sich mit steigender Belastungsgeschwindigkeit die Bruchlastspielzahl erhöht.

Aus den Versuchen von *CORNELISSEN* [18] (ABBILDUNG 6) und auch *REINHARDT ET AL* [84] (ABBILDUNG 7) ist bekannt, dass sich bei gleicher Beanspruchung mit einer hohen Frequenz (6 Hz bzw. 17,5 Hz) größere Bruchlastspielzahlen erreichen lassen, als mit niedrigen Frequenzen (0,06 Hz bzw. 0,175 Hz). Der Einfluss der Schwingungsbreite σ_u/β_p auf die Lebensdauer war bei niedrigen Frequenzen geringer als bei höheren Frequenzen.

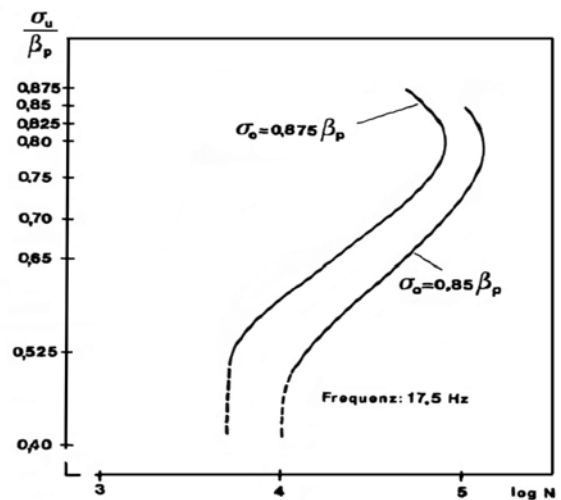


Abbildung 5: Einfluss der Oberspannung σ_o auf die Bruchlastspielzahl $\log N$ [84]

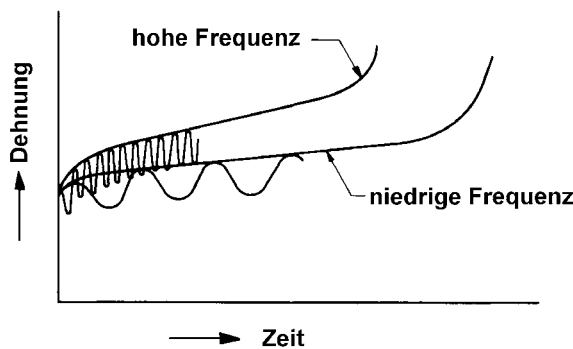


Abbildung 6: Zyklische Kriechkurve für hohe und niedrige Frequenzen (6 Hz, 0,06 Hz) [18]

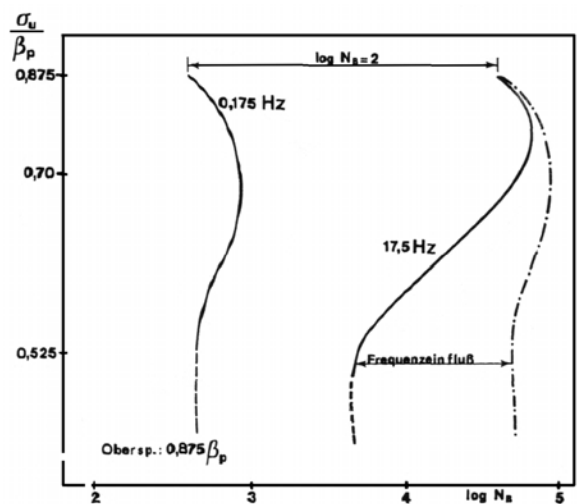


Abbildung 7: Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Bruchlastspielzahl $\log N$ [84]

3.3 Wöhlerversuche

Wöhlerlinien von Beton sind für Zug-, Druck-, Biegezug- und Spaltzugbeanspruchungen in zahlreichen Veröffentlichungen zu finden [4][18][29][44][55][81][98][100][113][123].

Wöhlerlinien (SIEHE KAPITEL 2.6, SEITE 5) wurden anfänglich unter konstanter und variabler Schwellbeanspruchung an vorwiegend ungekerbten Probekörpern experimentell ermittelt. Erst in jüngerer Zeit sind auch Ermüdungsuntersuchungen an wechselbeanspruchtem Beton durchgeführt worden [18][47][48][49][123]. Alle diese Untersuchungen weisen erhebliche Streuungen auf, da als Bezugswert die stark schwankende Kurzzeitfestigkeit (statische Betondruckfestigkeit) verwendet wurde. Es ist aber trotz zahlreicher Versuche noch nicht gelungen, diese für Metalle gültige Bestimmungsmethode der Ermüdung auf den mehrphasigen Werkstoff Beton zu übertragen. Es fehlt bislang eine allgemeingültige Beschreibung für die Festigkeitsabnahme bei dynamischer Dauerbeanspruchung, mit der eine eindeutige Vorhersage der Entwicklung der Betonfestigkeit möglich wäre.

3.4 "Dauerschwingfestigkeit" von Beton

An der Existenz einer Dauerschwingfestigkeit von Beton besteht theoretisch kein Zweifel. Wird durch die aufgebrachte Kraft die zur Lösung der Bindung benötigte Aktivierungsenergie nicht erreicht, kommt es zu keinen Dislokationsvorgängen und das Betongefüge bleibt unbeschädigt. Bislang konnte diese Dauerschwingfestigkeit bei Beton nicht bestätigt werden [55]. Es hat den Anschein, dass diese außerhalb der praktischen, experimentell zugänglichen Bereiche liegt. Aufgrund des fehlenden Nachweises kann Beton nur als zeitfest oder als „quasi-dauerfest“ angesehen werden. Auch nach mehreren Millionen Lastwechseln können Ermüdungsbrüche an Betonproben auftreten.

Bei Ermüdungsversuchen an Beton nimmt mit Verringerung der Spannungsamplitude σ_A , genau wie bei Stahl, die Schwingungsanzahl zu. Es fehlt aber der horizontal verlaufende Teil der dargestellten Wöhlerlinie, welcher eine Dauerschwingfestigkeit eines Werkstoffs beschreibt. Bei Beton kann von einer Ermüdungsfestigkeit gesprochen werden, die den Widerstand bzw. Dauer des Ermüdungsvorganges bis zum Versagen ausdrückt.

3.5 Schädigungsphasen der Ermüdung

Zyklisch-mechanische Belastungen ermüden im Laufe der Zeit den Beton. Betrachtet man dabei den Verformungsverlauf in Abhängigkeit der Lastspielzahl n/N (ABBILDUNG 8), so ist zu erkennen, dass der bleibende Verformungszuwachs, d.h. der Schädigungsgrad bei der Ermüdung in drei charakteristischen Phasen abläuft [19][27][45][51][54][91]. Über die Länge der einzelnen Phasen gibt es nach WEIGLER [55] voneinander abweichende Angaben.

- Phase I kennzeichnet die anfängliche nicht-lineare Zunahme der Dehnung.
- Phase II beginnt zwischen 10 % und 20 % der Bruchlastspielzahl N mit dem Übergang in einen konstanten, geringen Verformungszuwachs.
- Phase III wird bei rund 80 % der Bruchlastspielzahl N erreicht. Die Gesamtverformungen nehmen rapide, überproportional zu, was zum Versagen des Betons führt.

Dieser charakteristische Verlauf der sogenannten zyklischen Kriechkurve („cyclic creep curve“) ist für Druck-, Zug- und auch bei Biegebeanspruchungen wieder zu finden [18][47][54][110][123]. Dabei hängt die Ermüdungswiderstandsfähigkeit eines dynamisch belasteten Betons vorwiegend von der Länge der Phase II ab, in der die Schädigung, d.h. die Mikrorissbildung konstant, aber gering ansteigt [123]. Die Stärke der in Phase III am Ende der Lebenszeit auftretenden Dehnungsänderung ist nach GAEDE [32] von der Oberlast,

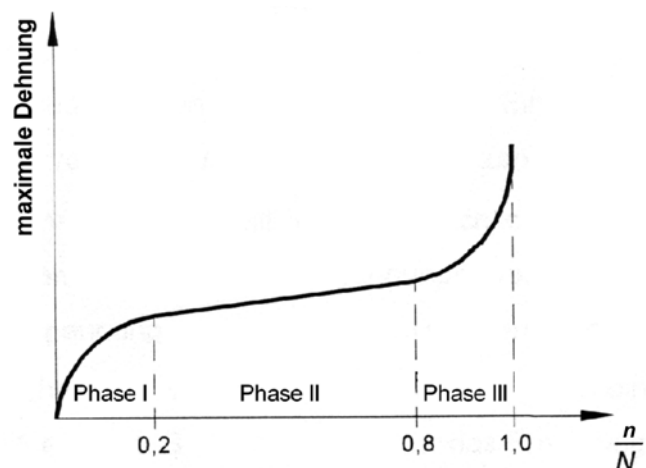


Abbildung 8: Phasen bei Ermüdungsbeanspruchung [8]

Schwingungsbreite und Betonfestigkeitsklasse abhängig. Schädigungs- bzw. Rissfortschritt verlaufen rapide und instabil. Mit steigender Betonfestigkeitsklasse wird in der Regel der am Schluss zum Bruch führende Verformungsanstieg steiler. Die Verformungszunahme in Phase I entsteht durch Rissbildung, Spannungumlagerung und einen Ausgleich von Fehlstellen [54]. Mit steigender Frequenz der Beanspruchung verkürzt sich nach CORNELISSEN [18] die Phase II und damit die Beanspruchungsdauer bis zum Versagen.

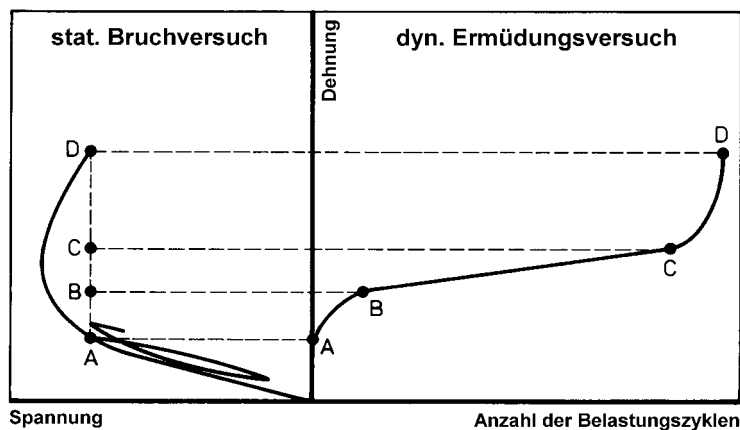


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Gegenüberstellung von Spannungs-Dehnungslinie und Ermüdungslinie [18]

Überträgt man die markanten Punkte des Ermüdungsverlaufes auf die Spannungs-Dehnungslinie eines statischen Bruchversuches, so sind auch dort die drei Phasen bis zum Bruch zu erkennen (ABBILDUNG 9). Der Punkt A kennzeichnet den Beginn der Ermüdung und der Phase I. Die Punkte B und C stellen die Übergänge von Phase I - II und von Phase II - III dar und der Punkt D das Versagen.

3.6 Einflüsse auf die Lebensdauer

Die Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit lassen sich in feste und variable Parameter unterteilen.

Zu den festen gegebenen Parametern aus den Werkstoffkennwerten zählen insbesondere:

- Steifigkeit,
- Festigkeit,
- Zusammensetzung und
- Alter bei Beginn der Belastung.

Die variablen Parameter aus der Versuchsdurchführung sind vorrangig:

- Beanspruchungshöhe und -art,
- Ruhephasen in der Beanspruchung,
- Frequenz,
- Betonfeuchtigkeitsgehalt und
- Umgebungsklima.

Die Ermüdungsversuche ließen unterschiedliche starke Auswirkung der untersuchten Einflussfaktoren auf die Bruchlastspielzahl erkennen. Der Ermüdungsschadensverlauf ist zeit- und einwirkungsabhängig. In einigen Versuchen [18][84][103] wurde eine starke Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit und -verformbarkeit von der Frequenz festgestellt.

3.7 Krümmungsumkehr der Spannungs-Dehnungslinie

Im allgemeinen verläuft eine Spannungs-Dehnungslinie von Beton, wie in den Regelwerken beschrieben, zur Dehnungsachse hin gekrümmt.

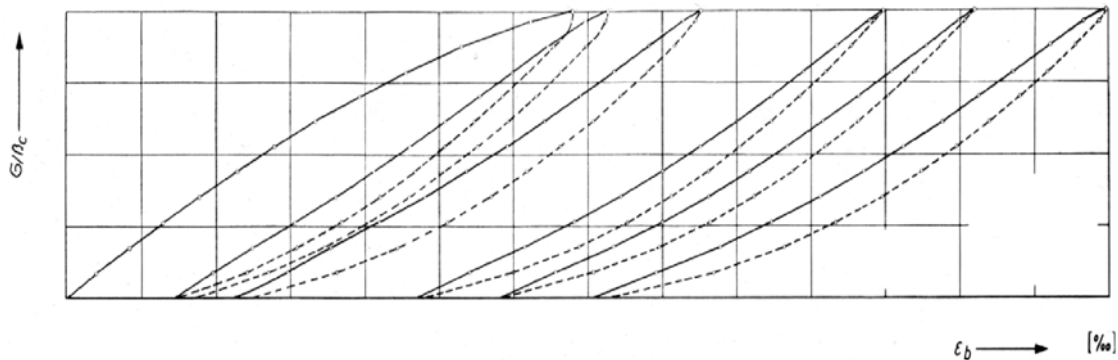


Abbildung 10: Krümmungsumkehr des Belastungsastes der Spannungs-Dehnungslinie [64]

Untersuchungen von *HOLMEN* [45], *KUNZE UND FRANK* [58] und *MEHMEL UND KERN* [64] ergaben, dass sich durch eine Druckschwellbeanspruchung die Krümmung des Belastungsastes der Spannungs-Dehnungslinie mit steigender Anzahl der Belastungszyklen von Beton umkehrt (*ABBILDUNG 10*). Die Ausprägung der Krümmungsumkehr ist von der Höhe der Beanspruchung, der Schwingungsbreite und auch dem Zementsteingehalt abhängig.

Bei Versuchen mit verschiedenen Natursteinen [5][35][36] wurden ähnliche Spannungs-Dehnungslinien-Verläufe beobachtet. *BACH* [5] führt diese Krümmungsumkehr auf die Zerstörung der Gefügestruktur durch geologische Vorbeanspruchung des Gesteins und *GRAF* [35][36] auf die Existenz von Hohlräumen im Gestein sowie das unterschiedliche Verformungsverhalten einzelner Gesteinsteile zurück. Versuche mit Probekörpern aus reinem Zementstein ergaben keine Krümmungsumkehr. Der Verlauf der Hystereseschleifen bleibt unverändert ellipsenförmig [46][58]. Diese Versuchsergebnisse über das Verformungsverhalten des Betons wurden bislang so gut wie nicht beachtet und bleiben in der Regelung unberücksichtigt.

3.8 Modellvorstellung der Betonermüdung

Grundlegende physikalische Vorgänge, wie Verformungen und Risswachstum, auf denen die Vorstellung der Betonermüdungs-Modelle basieren sind äußerst komplex, interaktiv, zeit- und spannungsabhängig und bislang nicht genügend erforscht, um quantitativ modelliert werden zu können.

Einige in der Literatur (*KAPITEL 3.1, SEITE 6*) zu findende Modellvorstellungen, welche das Ermüdungsverhalten beschreiben, gründen sich auf die Beobachtung, dass sich die Verlängerungen der Hystereseschleifen in einem gemeinsamen Punkt schneiden. Aus der Existenz eines solchen Schnittpunktes kann geschlossen werden, dass die Ermüdungswirkungen - Abnahme der Steifigkeit und die Zunahme der bleibenden Verformungen - in einem linearen Zusammenhang stehen und vermutlich für alle Beanspruchungsarten gelten.

Dieser Punkt wird in der Literatur unterschiedlich, als „common point“ [79], „focus-point“ [48], oder Pivot-Punkt [96] bezeichnet (*ABBILDUNG 11*). Zur Beschreibung des Verhaltens unter einfacher Ermüdungsbeanspruchung genügt ein Punkt [79]. In den einzelnen Modellen können auch mehrere solcher Schnittpunkte eingeführt werden, um den Verlauf im Druck- und Zugbereich der Be- und Entlastung abzubilden.

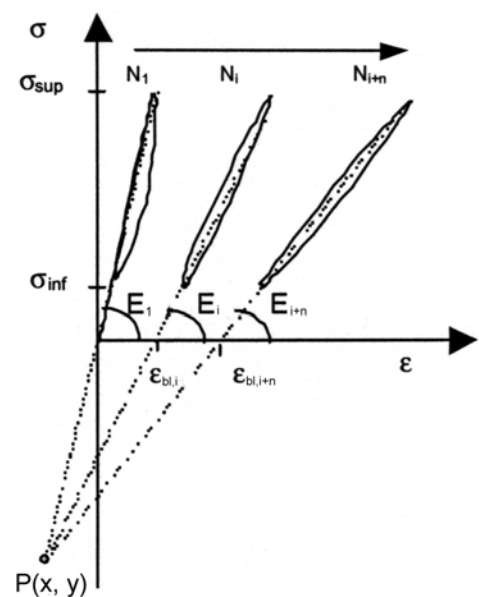


Abbildung 11: Pivot-Punkt

3.9 Lebensdauer-Beziehungen

Bei Ermüdungsbetrachtungen wird die Lebensdauer vorwiegend in Korrelation mit der Spannung oder der Verformungsgeschwindigkeit gesetzt.

3.9.1 Spannungs-Lebensdauer-Beziehung

Der Verlauf der Lebensdauerlinie wurde von WÖHLER [130] durch eine halblogarithmische Gerade und von BASQUIN [7] für metallische Werkstoffe durch eine im doppelt logarithmischen Maßstab dargestellte Gerade ausgedrückt, die jeweils durch eine horizontal laufende Gerade $\sigma = \sigma_A$ begrenzt wird.

Weitere Spannungs-Lastspielzahl-Beziehungen über die gesamte Lebensdauer formulierten WEIBULL, STÜSSI, GYLLTORFT [67] sowie auch die SIA DOKUMENTATION D0133 [102], welche analytisch die Wöhlerlinie für unbewehrten Beton unter Zug- und Druckbeanspruchung beschrieben.

Im CEB-FIP MODEL CODE [15] sind an WÖHLER anlehrende empirisch ermittelte Gleichungen zur Abschätzung der Bruchlastspielzahl zu finden. Diese gelten für Druck-, Zug- und Wechselbeanspruchungen (SIEHE AUCH KAPITEL 4.5.5.1, SEITE 47).

3.9.2 Verformungsgeschwindigkeit–Lebensdauer–Beziehung

Nach der gesichteten Literatur erscheint es möglich, die Lebensdauer von Bauwerken oder Bauteilen durch die Ermittlung der Kriech- bzw. Verformungsgeschwindigkeit in der Phase II der Ermüdungsschädigung (*secondary creep* $\dot{\epsilon}_{sec}$) mit Hilfe von Verformungsmessungen zu bestimmen. Praktisch aber sind noch keine realisierten, zufriedenstellenden, auf diesen Überlegungen basierenden, allgemeingültigen Anwendungen bekannt geworden. Somit ist auch diese abschätzende Beschreibung der Ermüdung von Beton noch nicht gänzlich geklärt und gilt demnach lediglich für die bislang durchgeführten Versuchsreihen unter festgelegten Randbedingungen.

CORNELISSEN UND REINHARDT [20] sowie auch WEIGLER UND RINGS [123] wiesen darauf hin, dass durch die Ermittlung der Verformungszunahme pro Zyklus bzw. pro Zeiteinheit in Phase II der Ermüdungsschädigung eine weitaus exaktere Vorhersage der Ermüdungsfestigkeit möglich ist, als mit den σ -N-Diagrammen.

Der Zeitpunkt des Versagens ($t=t_u$) kann mittels Verformungsmessungen abgeschätzt werden, da zwischen Kriechgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ in der Phase II und der Lebensdauer N ein Zusammenhang existiert, der in mehreren Literaturquellen [20][91][108][123] beschrieben und von CORNELISSEN [18] theoretisch nachgewiesen wurde. Die allgemeine Funktion, die bei doppeltlogarithmischer Darstellung eine Gerade ergibt, lautet:

$$\log t_u = C_1 - C_2 \log \dot{\epsilon}_{sec} \quad (3.1)$$

C_1 und C_2 sind dabei werkstoff- und versuchsabhängige Parameter.

Die bei WEIGLER UND RINGS [123] zusammengefasst dargestellten Lebensdauerbetrachtungen an normalfestem Beton basieren auf der Gleichung (3.1). Diese sind nachfolgend aufgelistet und für die maximale Verformung doppeltlogarithmisch in **ABBILDUNG 12** dargestellt. Der Verlauf der Regressionsgeraden ist abhängig von der Art der Beanspruchung. Die Regressionsgeraden von Druckschwellbelastung und Zugschwell- bzw. Wechselbeanspruchung sind parallel verschoben.

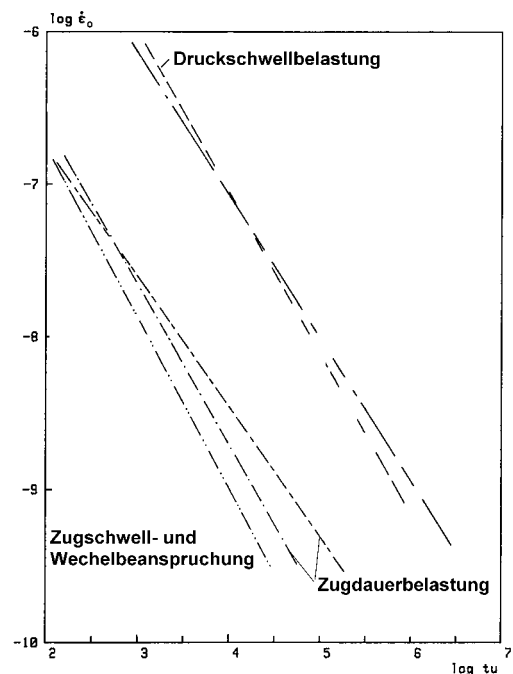


Abbildung 12: Lebensdauer t_u in Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit [123]

Die Wechselbeanspruchungsversuche von *WEIGLER UND RINGS* [123] ergaben folgende empirische Abschätzungen der Lebensdauerverläufe:

Für die maximale Verformung mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = -0,987$:

$$\log t_u = -3,56 - 1,07 \log \dot{\epsilon}_{o,sec} \quad (3.2)$$

und für die minimal Verformung mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = -0,950$:

$$\log t_u = -3,34 - 1,01 \log \dot{\epsilon}_{u,sec} \quad (3.3)$$

Ähnliche empirische Abschätzung sind:

- Druckschwellbeanspruchung [123]:

$$\log t_u = -2,66 - 0,94 \log \dot{\epsilon}_{sec} \quad (SPARKS) \quad (3.4)$$

- Zugdauerbeanspruchung [123]:

$$\log t_u = -5,99 - 1,18 \log \dot{\epsilon}_{sec} \quad (NISHIBAYASHI) \quad (3.5)$$

$$\log t_u = -4,37 - 0,96 \log \dot{\epsilon}_{sec} \quad (CORNELISSEN) \quad (3.6)$$

- Zugschwell- u. Wechselbeanspruchung [18]:

$$\log t_u = -4,02 - 0,89 \log \dot{\epsilon}_{sec} \quad (CORNELISSEN) \quad (3.7)$$

$$\log t_u = -3,25 - 0,89 \log \dot{\epsilon}_{sec} \quad (CORNELISSEN) \quad (3.8)$$

Die Untersuchungen zeigten gesichert, dass druckschwellbeanspruchter Beton einen größeren Ermüdungswiderstand aufweist, als ein zugschwell- bzw. wechselbeanspruchter Beton.

3.10 Schadensakkumulationshypothesen

Bauwerke und Bauteile unterliegen in der Praxis unterschiedlich wiederkehrenden Lastwechseln, die mit Hilfe von Schadensakkumulationshypothesen in mehrstufige Beanspruchungsgeschichten zusammengefasst werden können. Solche Schädigungsverläufe in Abhängigkeit der Bruchlastspielzahl wurden in einigen Arbeiten untersucht. *KLAUSEN UND WEIGLER* [54] betrachtete neben der Schallemission die Volumenänderung als Messgröße und *HOLMEN* [45] betrachtete bei seinen Druckschwellbeanspruchungsversuchen die zeitliche Veränderung der maximalen Längsdehnung ϵ_o als Kriterium der Schädigung. Dieser so ermittelte Schädigungsverlauf stimmte in den Phasen I und II gut mit den Kennwerten der Schallemissionsanalyse und der Ultraschallprüfung überein.

Der Verlauf der am häufigsten eingesetzten Schadensakkumulationshypothese von *PALMGREN-MINER* [66][78] unterscheidet sich erheblich von dem reellen Ermüdungsverlauf und anderen Bestimmungsverfahren. Die Palmgren-Miner-Regel kommt aus dem Stahlbau [66][78]. Sie geht von einer linearen Zunahme der Schädigungen bei steigender Schwingungsanzahl aus. Einzelne Teilschädigungen n_i/N_i werden bei mehrstufiger Schwingbeanspruchung linear zum Ermüdungsversagen D aufsummiert:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = 1 \quad \text{mit } n_i \dots \text{ Schwingungsanzahl, } N_i \dots \text{ Bruchlastspielzahl.}$$

Zahlreiche Untersuchungen ergaben, dass die Palmgren-Miner-Regel für Beton nicht geeignet ist [76][77][90][101]. Lastwechselabfolge, Beanspruchungsfrequenz und Ruhepausen werden dabei nicht berücksichtigt [20][61].

Bruchmechanische Untersuchungen [8][68][112][115] befassten sich mit der Thematik, Stoffgesetze zu entwickeln, welche die Rissfortschrittsgeschwindigkeit beschreiben. Grundsätzlich zeigen diese Ausführungen aber auch, dass auf der Grundlage des aus der linear elastischen Bruchmechanik stammenden Spannungsintensitätsfaktors, eine Beschreibung der bei der Ermüdung auftretenden Rissentwicklung im Beton nicht befriedigend gelingt.

3.11 Rissbildungsmechanismus

BRANDTZAEG [32] berichtete 1929, dass bei statischen Druckversuchen das Volumen von Beton merklich ab einer Spannung von rund 75 % der Druckfestigkeit durch vermutlich einsetzendes starkes Risswachstum ansteigt. Er bezeichnete diesen Punkt als „kritische Spannung“ des Betons (siehe Kapitel 2.4, Seite 4). Weitere Untersuchungen [33][34][35][36] verifizieren grundsätzlich diese Erkenntnis mit der Erweiterung, dass die Rissbildung und das Risswachstum weitaus früher beginnt.

Physikalische Erklärungen des Rissverhaltens folgen aus der Heterogenität des Betons. Ein Riss im Beton kann nicht als ein glatter „gefräster“ Schnitt angesehen werden, der zwei Teilkörper vollständig voneinander trennt, sondern als Riss mit einer äußerst rauen Oberfläche, der mannigfach durch rissüberbrückende Körner verzahnt ist. Ein Riss im Beton setzt sich aus einer Mehrzahl von Mikro- und Makrorissen zusammen, welche dreidimensional in verschiedenen Ebenen und unter verschiedenen Winkeln angeordnet sein können.

Schwachstellen und Gefügedefekte sind in aller Regel Entstehungspunkte für Risse. Schädigungen und Mikrorisse im heterogenen Beton entstehen bereits ohne äußere Lasten, durch lokales Überschreiten des Verformungsvermögens.

Beton zeigt ein wesentlich duktileres Verhalten als seine Einzelkomponenten, die sich eher linear-elastisch und spröde verhalten. Nach dem Erreichen der maximalen Festigkeit kommt es beim Zuschlag und Zementstein zu einem raschen Versagen. Bei Beton hingegen nimmt mit weiter zunehmender Dehnung die Spannung stetig ab, allgemein als „strain-softening“ bezeichnet.

Zwischen den durch Kohäsionskräfte im adhäsiven Verbund befindlichen Komponenten, Zuschlag und Matrix entsteht eine „Kontaktzone“, die in **ABBILDUNG 13** als Strukturmodell nach REHM und ZIMBELMANN [83] dargestellt ist.

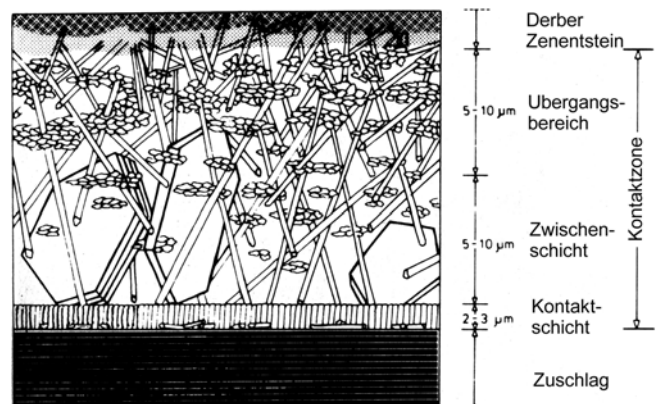


Abbildung 13: Strukturmodell der Kontaktzone [83]

Festigkeitsmindernd wirkt innerhalb der Kontaktzone eine erhöhte Grenzschichtporosität (in Form von Hohlräumen und Gefügedefekten), die durch Schwinden und Eigenspannungen hervorgerufen werden kann.

- Die Zementkörner wachsen während der Hydratation einseitig gegen den Zuschlag. Aus diesem Grunde ist die Packung in der Kontaktzone weniger dicht als im Innern des Zementsteins (**ABBILDUNG 14**) [12][53].
- Durch den sogenannten Setzungseffekt (**ABBILDUNG 15**) kann es zu porösen Schichten unter den Zuschlagkörnern kommen. Dies kann infolge differenzierter Setzungen zwischen Zementleim und Zuschlag sowie durch die Entmischung von Wasser und Zement im Zementleim geschehen [53].

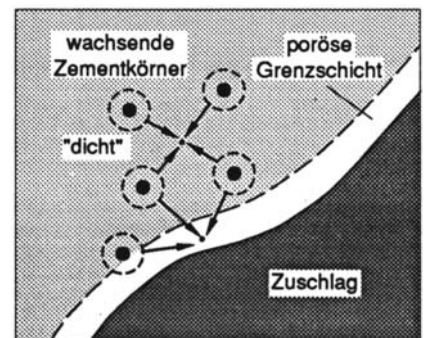


Abbildung 14: Korngrenzeneffekt [53]

Das Verformungsvermögen an den Verbundflächen ist ebenfalls kleiner als innerhalb der Matrix.

Im Betongefüge können sich Risse sowohl im belasteten als auch im unbelasteten Zustand bilden. Nachfolgend werden die einzelnen Rissentstehungsmechanismen beschrieben.

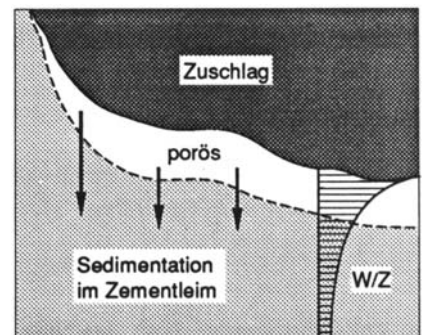


Abbildung 15: Setzungseffekt [53]

3.11.1 Rissentstehung im unbelasteten Beton

Beton weist bereits im unbelasteten Zustand eine große Anzahl von Rissen in der Grenzfläche von Matrix und Zuschlag auf. Ursachen für die erhöhte Grenzschichtporosität sind Mikrorisse infolge von Inkompatibilitäten zwischen Zuschlag und Zementstein.

Mechanische, thermische und hygrische Inkompatibilitäten verursachen eine Erhöhung der bereits bestehenden Porosität im Beton [53] durch Ausbildung von Mikrorissen und Verbundschwächen entlang der Korngrenzen.

- Die mechanische Inkompatibilität wird hauptsächlich durch den, gegenüber dem Zuschlag, bis zu viermal kleineren E-Modul des Zementsteins verursacht. Dies kann dazu führen, dass im Bereich zwischen den Körnern der Zementstein Zugspannungen ausgesetzt wird, welche, wie in *ABBILDUNG 16* zu sehen, kernverbindende Mikrorisse zur Folge haben können.
- Die thermische Inkompatibilität beruht auf den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten des Zuschlags und des Zementsteins. Bei Temperaturänderungen kann es durch den bis zu zweimal größeren Ausdehnungskoeffizienten des Zementsteins zu einer Zugringbildung um die Zuschlagkörner mit entsprechenden Ablöseerscheinungen und Mikrorissen an den Korngrenzen, wie in *ABBILDUNG 17* dargestellt, kommen.

Temperaturänderungen von $\Delta T = 20 \text{ K}$ können bereits zum Überschreiten der Zugfestigkeit in der Grenzschicht führen. Auch während des Abbindeprozesses können derartige Mikrorisse durch die auftretende Hydratationswärme entstehen, so dass von Beginn an ein geschädigtes Gefüge vorliegt.

- Die hygrische Inkompatibilität wird durch die unterschiedlichen Schwindmaße von Zuschlag und Zementstein hervorgerufen. Es entsteht, wie die thermische Inkompatibilität, die beschriebene Zugringbildung, die unter Umständen den thermischen Effekt verstärken können [53].

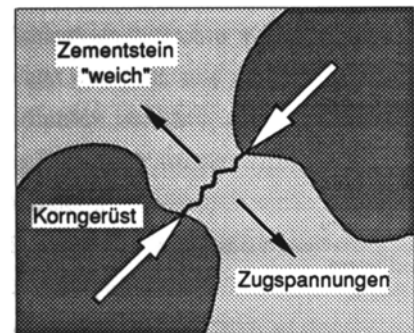


Abbildung 16: Mikrorisse durch mechanische Inkompatibilität [53]

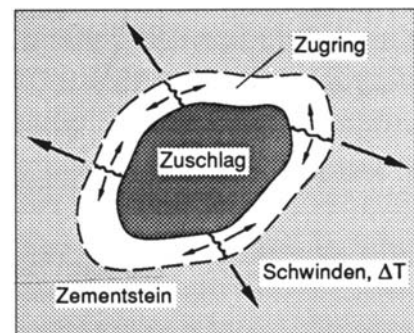


Abbildung 17: Mikrorisse aus thermischer und hygrischer Inkompatibilität [53]

Die auftretenden Eigenspannungszustände des Betons hängen in erster Linie von der Betonnachbehandlung ab, die den Verlauf der Hydratationswärmeabgabe und die Betonaustrocknung steuert. Die Eigenspannungen können zu lokalen Mikrorissbildungen führen, welche die Eigenspannungen abbauen. Hohe Eigenspannungen bewirken eine zu vernachlässigende Verkürzung der Phase I, in der weitestgehend die Rissbildung stattfindet. Die anderen Phasen (II und III) werden nicht beeinflusst.

3.11.2 Rissentstehung und -entwicklung bei Druckbeanspruchung

Im Beton führen wegen der Inhomogenität und den daraus resultierenden Spannungskonzentrationen schon sehr kleine globale Beanspruchungen zu hohen lokalen Spannungen. Durch jede Beanspruchung und Überschreiten des Verformungsvermögens entstehen Risse.

LUSCHE [62] zeigt in einem Betonmodell in **ABBILDUNG 18** die Spannungsverteilung bei Druckbelastung, ohne Berücksichtigung der belastungsabhängigen Mikrorissbildung. Maßgebend für die Aufnahmefähigkeit von äußeren Lasten ist die innere Zugfestigkeit des Betons. Die Beanspruchungshöhe ist abhängig von der Höhe

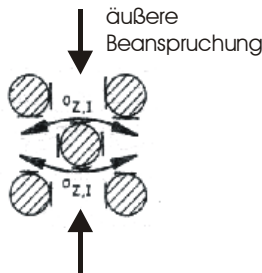


Abbildung 19: Zugbeanspruchung der Matrix bei äußerer Druckbelastung, ($\sigma_{z,1}$... lokale Zugspannung)

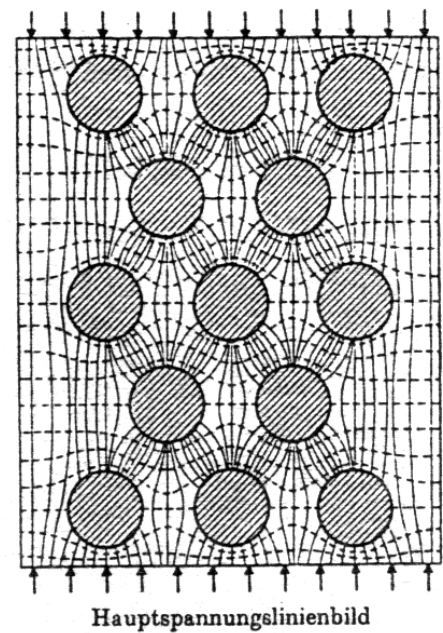


Abbildung 18: Spannungsverteilung im Betonmodell [62]

der Haftfestigkeit zwischen Matrix und Zuschlag sowie der Zugfestigkeit der Matrix. Äußere Druckspannungen verursachen senkrecht zur Krafteinleitungsrichtung Zugspannungen im Beton (**ABBILDUNG 19**). Wird die Haft- bzw. Zugfestigkeit eines Betons durch diese resultierenden Spannungen überschritten, treten Mikrorisse vorwiegend als Haft- und Matrixrisse auf. Diese verlaufen - ausgehend von den Zuschlagkörnerseiten - parallel zur Kraftrichtung. Zusätzlich treten bei Entlastung senkrecht zur Kraftrichtung an den Ober- und Unterseiten der Zuschläge Risse auf, die auf Eigenspannungen aufgrund von Rückstellkräften zurückgeführt werden. Sie entstehen durch unterschiedliche Steifigkeiten und dem daraus resultierenden unterschiedlichen Verformungsvermögen der Matrix bei Entlastung.

Diskontinuitäten, wie Poren oder Zuschlagkörner (**ABBILDUNG 20**), lenken bei Belastung im Beton die Spannungstrajektorien ab, was zu Spannungskonzentrationen und somit zu lokalen Verformungen der Zementmatrix führt. In diesem Bereich sind die lokalen Verformungen größer als in den umliegenden Gebieten und ebenfalls ausgeprägter als die globale Verformung.

Wird die Zugfestigkeit in der lokalen Zone überschritten, bilden sich Risse und an den Rissufern eine

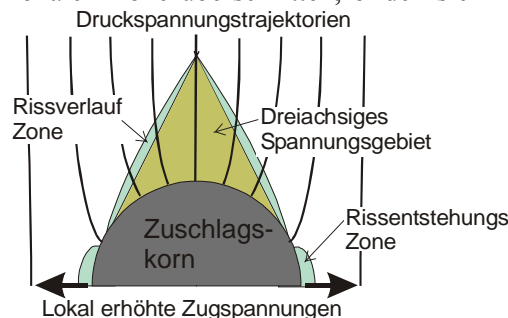


Abbildung 20: Modell der Rissbildung (Zuschlagkorn)

bleibende plastische Zone. Die Lage der aktiven plastischen Zonen verschiebt sich mit dem Risswachstum.

Die Rissbildung im Beton tritt hauptsächlich ab Beanspruchungen über 30 % der Druckfestigkeit auf. Bis etwa 30 % der Druckfestigkeit verändern sich die Mikrorisse kaum, und nach einer Entlastung sind nur geringe bleibende Verformungen zu registrieren [125].

Allgemein betrachtet lässt sich der Bruchmechanismus und die Rissentwicklung eines einachsigen statisch druckbeanspruchten Betons in drei Stadien einordnen [84].

Siehe dazu auch *ABBILDUNG 21*.

- Im ersten Stadium bis rund 75 % der Druckfestigkeit entstehen neben den bereits in der Verbundzone Matrix-Zuschlagkorn vorhandenen Rissen entlang der Rissverlauf-Zone (außerhalb des dreiaxialen Druckspannungsgebietes) etwa parallel zur Druckbeanspruchungsrichtung verlaufende Mikrorisse. Das dreiaxiale Druckspannungsgebiet befindet sich an der Ober- und Unterseite der Zuschlagkörner.
- Im zweiten Stadium zwischen etwa 65 % und 75 % der Druckfestigkeit beginnt eine Gefügeauflockerung. Die Verbundrisse verlassen das Grenzgebiet zwischen Matrix und Zuschlagkorn und pflanzen sich im vorgeschädigten Matrixbereich in Richtung der maximalen Schubspannung entlang der Rissverlauf-Zone fort.

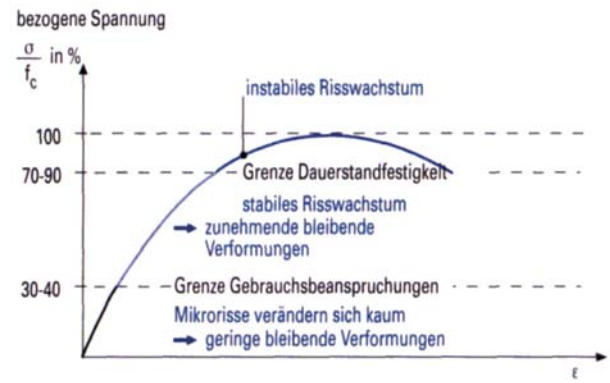


Abbildung 21: Rissbildung und -entwicklungsstadien in Abhängigkeit der Druckbelastung [118]

Durch Längsverschiebungen wird das Material entlang der Risszone verdreht, verformt und endlich zerbröckelt, so dass doppelkegelförmige Elemente (ein Zuschlagkorn, an dem oben und unten Matrixspitzen haften) entstehen. Zu diesem Zeitpunkt kann bereits die maximale Druckfestigkeit überschritten sein.

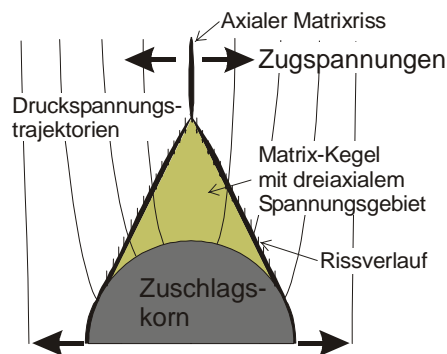


Abbildung 22: Entstehen von axialen Mörtelrissen an den Matrix-Kegelspitzen

- Im dritten Stadium, ab einem Spannungsbereich von rund 75 % bis 85 % der Druckfestigkeit entstehen axiale Mörtelrisse. Diese entstehen an den Matrix-Kegelspitzen infolge quergerichteter Zugspannung und führen letztendlich zur Bildung von durchgehenden Axialrissen (*ABBILDUNG 22*). In diesem Stadium kommt es durch die Axialrissentwicklung zur rapiden Erhöhung der Querdehnung und zum Anwachsen des Volumens (*ABBILDUNG 3, SEITE 4*). *BRANDTZAEG ET AL* [87] beobachteten diesen Volumenanstieg und bezeichneten diesen Punkt als „kritische Spannung“ (*SIEHE KAPITEL 2.4, SEITE 4*). Zahlreiche weitere Untersuchungen [52][59][97][99] bestätigten und ergänzten diese Erkenntnis. Das Gefüge wird instabil, es kommt zu einem überproportionalen Risswachstum und zum Verbinden der Einzelrisse. Bei konstanter Verformungsgeschwindigkeit wird die Steigung der Spannungs-Dehnungslinie gleich Null. Das Gefüge besteht nur noch aus einzelnen Matrix-Zuschlag-Säulen. Die Spannungs-Dehnungs-Linie fällt bis zur völligen Zerstörung ab.

3.11.3 Rissentwicklung bei der Betonermüdung

Für die Betrachtung der Rissentstehung und -entwicklung bei der Betonermüdung sowie die Erläuterung der dabei auftretenden Mechanismen ist eine Aufteilung in Betrachtungsebenen vorteilhaft. Nach WITTMANN [127] lässt sich Beton mit Hilfe von drei Abbildungsebenen beschreiben:

- Makro-Ebene: Betrachtet den Beton global als ein homogenes „Einstoffsystem“ mit seinen Festigkeits- und Verformungseigenschaften.
- Meso-Ebene: Der heterogene Werkstoff Beton wird als Mehrkomponentensystem - bestehend aus Zementstein, Zuschlag, Poren und nicht gebundenem Wasser - mit den Verbundeigenschaften zwischen Korn und Matrix sowie Mikro- und Makrorissen betrachtet.
- Mikro-Ebene: Diese umfasst die Objekte des Zementsteines von molekularer Größenordnung und die dabei ablaufenden chemischen und physikalischen Prozesse, wie Hydratation, Wärmeentwicklung und den Einfluss auf den Gehalt an nicht gebundenem Wasser.

Die Sichtung der Literatur hat gezeigt, dass es Kenntnislücken hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens von Beton und dessen Modellierung unter Druckschwellbeanspruchung gibt. Die Bemühungen, das Verhalten des Betons unter zyklisch-mechanischer Beanspruchung zu beschreiben, führte zu unterschiedlichen Konzepten, die überwiegend auf bruchmechanischen Modellvorstellungen auf der Makro-Ebene (Beton als homogener Werkstoff) beruhen [14][26][40][47][68][71][86][106][112][116][132]. Das Verhalten von Mikrorissen auf Meso-Ebene ist bislang wenig erforscht [84][115].

Eine Übertragung der aus der Metallforschung stammenden Hypothesen auf Beton gelingt nur unzureichend. In allen diesen Betrachtungen spielt die Rissentstehung, der Rissfortschritt sowie die notwendige Energie zu deren Entwicklung eine wichtige Rolle. Die Ergebnisse dieser Ermüdungsversuche an Beton lassen, aufgrund erheblicher Streuung, keine gesicherte Aussage zu. Die Beschreibung der Verformungs- und Festigkeitsabnahme infolge einer Ermüdungsbeanspruchung gelingt daher mit denen in der Literatur genannten Formulierungen, Regeln und Hypothesen auch nur sehr ungenau. Eine Abschätzung der Lebensdauer ist bislang mit Hilfe von theoretischen Betrachtungen der Gefügeschädigung nicht möglich.

▪ Makro-Ebene

Auf Makro-Ebene betrachtet, „kriecht“ Beton und Zementstein aufgrund seiner viskoelastischen Eigenschaften unter einer mechanisch einwirkenden Dauerlast, wie bei Stand- oder Ermüdungsbelastungen. Dieses spannungs- und zeitabhängiges Verhalten, das „Kriechen“, führt zu Verformungen und Schädigungsvorgängen, wie beispielsweise Rissbildung und Ablösungen. Die Verformungen sind teilweise irreversible, aber nach Definition des Schädigungsbegriffs keine Schädigungen. Ein Werkstoff gilt erst dann als geschädigt, wenn das lokale Verformungsvermögen überschritten ist. Das Verformungsvermögen ist abhängig von der Verformungsgeschwindigkeit. Bei Langzeitbeanspruchungen können am Beton wesentlich höhere Verformungen auftreten als bei kurzzeitigen statischen Bruchversuchen. Die dabei auftretenden Schädigungen sind vom gleichen Charakter: Lokale Schädigungen in Form von Mikrorissen und Ablösungen zwischen Zementstein und Zuschlag infolge kurzzeitiger Überbeanspruchung.

Auf Makro-Ebene können bei Ermüdungsversuchen zwei Ermüdungswirkungen beobachtet werden: „irreversible Verformungen“ und „Steifigkeitsverlust“.

Überschreiten Verformungen das lokale Verformungsvermögen des Zementsteins oder der Verbundzone zwischen Zementstein und Korn so entstehen Mikrorisse, wie in *KAPITEL 3.11, SEITE 13* beschrieben. Die Folge ist eine Abnahme der Steifigkeit des Werkstoffs. Die viskose Verformung in der gerissenen Zone bildet sich, aufgrund der entstehenden Entlastung, zum Teil (reversibler Anteil, wie beim Kriechversuch) wieder zurück. Die Ausbreitung der Risse kann durch Zuschlagkörner und Poren begrenzt bzw. abgelenkt werden, aber auch durch Zusammenmünden anwachsen [111].

Nicht nur Verformungen können Schädigungen hervorrufen, sondern auch Verformungen aus physikalischen und chemischen Beanspruchungen, sofern das Verformungsvermögen des Werkstoffs dadurch überschritten wird.

- Meso-Ebene

Auf Meso-Ebene betrachtet, erfolgt die Betonermüdung nicht nur durch eine einzelne Schädigungsursache, sondern durch mehrere in Wechselbeziehung stehenden Schädigungen aus verschiedenen Einwirkungen. Verformungen werden als kleine lokale Verformungen angesehen. Das lokale und globale Verhalten wird von den gleichen Einflussfaktoren bestimmt. Der wichtigste Einflussfaktor ist dabei der Gehalt an freiem Wasser, der wiederum vom Hydratationsgrad, dem Wasser-Zement-Wert und der Nachbehandlung des Betons abhängt.

Die Rissentstehung und –entwicklung bei der Ermüdung wird bei der Belastung und bei der Entlastung vorangetrieben. Wiederkehrende kurzfristige Mechanismen beschleunigen bei Langzeitversuchen das Betonversagen.

- Beim Entlastungsvorgang verformt sich das durch das Abscheren entlastete Zuschlagkornelement weniger stark zurück als die umschließende Matrix. Längszugspannungen im Kornelement entstehen, welche die Rissbildung in der Verbundzone, besonders an den der Belastung zugewandten Stellen, anregen (ABBILDUNG 23);
- Durch die unterschiedliche Geschwindigkeit der sich quer zur Spannungsrichtung bewegenden Gefügeteilchen kommt es bei der Entlastung zu rissfördernden Eigenspannungen;
- Bei Ermüdungsbeanspruchungen können hohe Belastungsgeschwindigkeiten auftreten. Beton reagiert auf eine zunehmende Belastungsgeschwindigkeit spröder (ABBILDUNG 1, SEITE 3). Das Verformungsvermögen nimmt ab und die scheinbare Bruchfestigkeit steigt an;
- Bei den Rissen treten infolge des Öffnens und Schließens mechanische Schädigungseffekte auf.

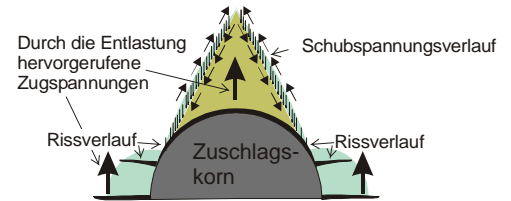


Abbildung 23: Charakteristische Bruchelemente bei Druckentlastung

3.11.4 Betrachtungen im Zusammenhang mit der Betonermüdung

Weitere Erkenntnisse und Versuchsergebnisse können die Betrachtung der Betonermüdung unterstützen, wie beispielsweise die Betrachtung von Bruchflächen und Versuche zur mechanischen rissinternen Abnutzung.

- Bruchflächenbetrachtung

Interessant ist die Beobachtung, dass bei dynamisch beanspruchtem Normalbeton, der mit hoher Belastungsgeschwindigkeit versagt, die Risse vermehrt durch das Zuschlagkorn laufen. Bei statischen Bruchversuchen mit geringer Belastungsgeschwindigkeit verlaufen die Risse üblicherweise entlang der Korngrenzschicht, da diese aufgrund ihres porösen Charakters die niedrige „statische“ Festigkeit aufweisen (ABBILDUNG 24 UND ABBILDUNG 25). Dieses Verhalten lässt sich durch die unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Spannung im Korn und in der Matrix erklären [23][34].

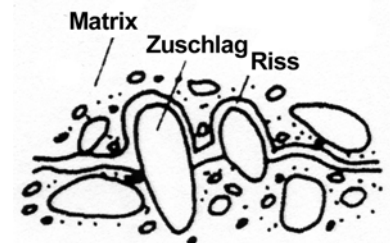


Abbildung 24: Rissverlauf bei geringer Dehnungsrate [75]

ROSSI [95] stellt diesbezüglich die Überlegung an, dass sich Wasser bevorzugt in dem porösen Bereich der Grenzschicht zwischen Matrix und Zuschlag lokalisiert und dort infolge seines viskosen Einflusses kraftübertragend wirkt. Das führt bei hohen Dehnungsraten dazu, dass lokale Spannungsspitzen am Zuschlagkorn auftreten, die zum Versagen der Zuschlagkörner führen können.

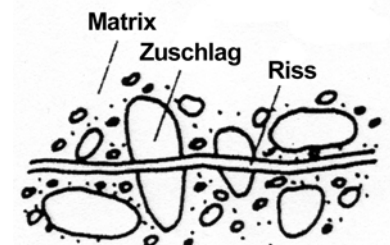


Abbildung 25: Rissverlauf bei hoher Dehnungsrate mit Kornversagen [75]

Bei Untersuchungen von MECHTCHERINE ET AL [75] konnte mit steigender Dehnungsrate eine Verringerung der fraktalen Dimensionen auf der Bruchfläche, d.h. eine glattere Bruchfläche beobachtet werden.

- Mechanische rissinterne Abnutzung

Auf Makro-Ebene kann die mechanische Zerstörung der Zementmatrix durch rissinterne Reibung als Ermüdungsvorgang betrachtet werden (ABBILDUNG 26). Dies wurde von WALRAVEN ET AL [121] bei Betonriss-Verzahnungs-Versuchen beobachtet.

Es wurde ein Betonelement auf Zug gerissen und die Rissoberfläche danach lateralen Lastwechseln ausgesetzt. Nach wenigen hundert Lastwechseln sank die Kraft, die für eine anfängliche Schlupfdifferenz notwendig war, stark ab. Nach jeder Erhöhung der lateralen Schlupfdifferenz wurde wiederum anfangs eine hohe Kraft gemessen, welche nach wenigen Lastwechseln abnahm. Daraus wurde gefolgert, dass innerhalb der gewählten Schlupfgrenzen die Verzahnung der Rissoberfläche schnell infolge der entstehenden Reibung abgetragen wird und eine Schlupfvergrößerung erneute Verzahnungen aktiviert.

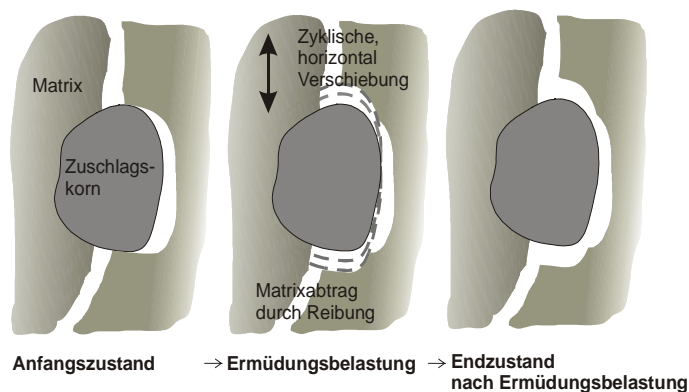


Abbildung 26: Rissinterne Reibung als Zerstörungsmechanismus

3.12 Allgemeine Betrachtung des vorhandenen Wissenstandes

Die aus der Literatur vorliegenden Untersuchungen zeigen wegen der starken Streuung der Ergebnisse und der geringen Zahl der geprüften Probekörper (je Parameter) nur Tendenzen auf. Aufgrund der unterschiedlichen Vorgehensweisen und Randbedingungen ist ein Vergleich der existierenden Ermüdungsuntersuchungen untereinander kaum möglich.

Für Recyclingbeton liegen Erfahrungen über das Ermüdungsverhalten noch nicht vor.

Ansätze für eine Lebensdauerabschätzung sind zahlreich beschrieben und in vielen Formen vorhanden, aber keine dieser Abschätzungen, wie auch die Verfahren der Bruchmechanik, ergaben bislang eine praktisch zufriedenstellende Anwendung. Daher sind für ein besseres Verständnis und um fundierte Aussagen treffen zu können weitere objektiv vergleichbare experimentelle Untersuchungen notwendig.

Betrachtet man den Stand der Erkenntnisse, so ist im wesentlichen folgendes über die Ermüdung von Beton bei Druckschwellbeanspruchung bekannt:

- Hohe Oberspannungen und große Spannungsamplituden ergeben geringe Bruchlastspielzahlen.
- Hohe Beanspruchungsfrequenzen ergeben höhere Bruchlastspielzahlen.
- Ruhephasen wirken sich günstig auf die Lebensdauer aus.
- Die Ermüdungsfestigkeit von wassergesättigtem bzw. feuchtgelagertem Beton ist geringer als die eines vergleichbaren luftgelagerten Betons.
- Die Betonfestigkeit bei andauernder Schwellbeanspruchung ist stets kleiner als die bei statischer Beanspruchung.
- Für die auftretenden Streuungen bei den Dauerschwingfestigkeitsversuchen ist keine statistische Verteilung zu erkennen.
- Bei Beton ist es nicht möglich, mit Hilfe der Miner-Regel praxisnahe Beanspruchungen zutreffend wiederzugeben. Die Reihenfolge der Belastungshöhe beim Zwei-Stufen-Versuch ist entscheidend.
- Die Bruchlastspielzahl bei vergleichbaren zentrischen Druckschwellversuchen ist wegen der fehlenden Möglichkeit einer Spannungumlagerung kleiner als die eines Biegebalkens bei Biegedruckbeanspruchung.
- Wechsel- und Zugschwellbeanspruchungen ergeben ähnliche Bruchlastspielzahlen.

Die im Stand der Erkenntnisse beschriebenen Methoden zur Bestimmung der Lebensdauer sowie des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Beton unter dynamischer Beanspruchung basieren auf einzelnen empirischen Modellen und haben in der Regel Oberspannung und Verformungszunahme pro Lastwechsel als Eingangparameter. Wichtige Einflussgrößen wie Betoneigenschaften, Belastungsspektren, Beanspruchungsfrequenz, Ruhephasen und auch Umwelteinflüsse werden nicht berücksichtigt.

4 Eigene Untersuchungen

4.1 Verwendete Betone

Die Ermüdungsversuche fanden hauptsächlich an zylindrischen Betonprobekörpern (\varnothing ~100 mm und Höhe ~300 mm) der Festigkeitsklassen B25, B45 und B95 statt, welche für die Untersuchungen hergestellt wurden.

4.1.1 Betonzusammensetzung

In *TABELLE 2* sind die Zusammensetzungen der hergestellten Betone zusammengefasst. Weitere Informationen über die Herstellungsrezepturen mit Korngruppen, Größtkorn und Sieblinie befinden sich im *ANHANG A2*.

Tabelle 2: Betonzusammensetzung

Stoffe	Probenserie				
	B 25rec	B 25jap	B 25	B 45	B 95
Zementart	CEM I 32,5 R	CEM I 32,5 R	CEM I 32,5 R	CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 R
Zementmenge [kg/m ³]	300	330	300	400	500
Größtkorn	32	8	16	16	16
Zuschlag [kg/m ³]	1572	1751	1816	1763	1735
Wasser [kg/m ³]	190	206	190	180	124
Zusatzmittel [l/m ³]	3,1	1,88	-	-	25
Zusatzstoffe Mikrosilika * [kg/m ³]	-	-	-	-	50
w/z-Wert	0,63	0,63	0,63	0,45	0,25

* Trockenmasse

Als Zuschlag wurde für alle hergestellten Betone gewaschener, luftgelagerter quarzitischer Kies und Sand aus Okrilla verwendet. Beim Recyclingbeton B 25rec bestanden die Korngruppen > 2 mm aus rezykliertem Betonbruch und < 2 mm aus natürlichem Sand. Der Zement CEM I 32,5 R und CEM I 42,5 R stammt aus unterschiedlichen Werken. Es wurden Normprüfungen nach DIN EN 196 durchgeführt. Die Ergebnisse sind im *ANHANG A4* zu finden.

4.1.2 Herstellung der Probekörper

Pro Serie wurden 115 Liter Beton gefertigt. Daraus wurden 31 Zylinder und drei Würfel mit 150 mm Kantenlänge hergestellt. Durch sorgfältige und vergleichbare Herstellung der Probekörper wurde versucht, die Streuung der mechanischen Festbetoneigenschaften zu minimieren.

Die verwendeten Formen zur Herstellung der zylindrischen Probekörper waren Kunststoffröhren mit einem Standfuß aus Kunststoff. Die Probekörper wurden stehend mit einem ca. 100 mm hohen Aufsatz gefertigt. Der zur Mischung der Betonbestandteile verwendete Zwangsmischer hat ein Fassungsvermögen von 250 Liter. Der Mischvorgang und die -dauer sind im Folgenden aufgelistet.

- Mischungsanweisung normalfester Beton (B 25, B 45)

Zuschlag und Zement in den Mischer geben – Masse ca. 1 min mischen – Wassermenge in laufenden Mischer zugeben Masse ca. 5 min mischen.

- Mischungsanweisung hochfester Beton (B 95)

Zuschlag bis 8 mm und Zement in den Mischer geben – Gemisch 1 min mischen – Wassermenge und Silikasuspension in den Mischer geben – Gemisch 3 min mischen – Zuschlag 8/16 zugeben – Gemisch weitere 2 min mischen – Fließmittel zugeben – Gemisch 5 min mischen – fertig nach der 11. Minute.

- Anschließende Verarbeitung

Frischbetoneigenschaften bestimmen (Ausbreitmaß, Luftporengehalt) – Anschließend erneut 15 sek. mischen – Formen füllen auf dem Rütteltisch – Rüttelzeit ca. 15 sek. bei 180 Hz.

Der Beton wurde mit Hilfe eines Hochfrequenzrütteltisches verdichtet. Die Dauer der gesamten Betonierarbeiten betrug rund 1 Std. von Beginn des Mischungsvorganges bis zur Befüllung der letzten Probekörperform.

4.1.3 Frischbetonprüfungen

Die Herstellung begleitend wurden die folgende Frischbetonprüfungen durchgeführt. Die Ergebniswerte sind im *ANHANG A3* zusammengestellt.

- Konsistenzmessung am Ausbreittisch nach DIN 1048 Teil 1
- Rohdichtemessung des Frischbetons anhand der für die Güteprüfung nach DIN 1048, Teil 1 hergestellten Würfel und des 8-Liter-Topfes des Luftporen-Prüfgerätes.
- Messung des Gesamtluftgehaltes mit einem 8-Liter-Luftporentopf nach DIN 1048 Teil 1, Abschnitt 3.5 (Druckausgleichsverfahren).

4.1.4 Nachbehandlung und Lagerung

Nach Herstellung wurden die Probekörper mit einer PE-Folie abgedeckt und 24 h gelagert. Nach dem Ausschalen, Beschriften und Vermaßen kamen alle Probekörper bis zum 7. Tag in ein Wasserbad (20°C ± 2°C). Ein Teil der Probekörper verblieb bis zur Prüfung im Wasser und der andere Teil wurde am 7. Tag in einen Klimaraum (20°C ± 1°C und 65 % r. F. ± 3 % r. F.) umgelagert. Die Druckflächen wurden in den ersten sieben Tagen Wasserlagerung planparallel geschliffen.

4.1.5 Festigkeit und E-Modul

Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgte an Betonwürfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm nach DIN 1048 Teil 5 im Alter von 28 Tagen. Die Prüfungsergebnisse befinden sich im *ANHANG A6*. Die Mittelwerte der 28-Tage-Würfelfestigkeiten der einzelnen Betone sind aus der nachfolgenden *TABELLE 3* ersichtlich.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Bruchfestigkeiten und E-Moduln im Alter von 28 Tagen

Betonart		$\beta_{w,28d}$ [MPa]	$\beta_{c,28d}$ [MPa]	$E_{c,28d}$ [MPa]	$E_{dyn,En1,28d}$ [MPa]	$E_{dyn,US,28d}$ [MPa]
B25 jap	Trocken- gelagert	34,2	30,8	27.700	35.800	39.400
B25 rec		36,2	31,2	22.800	27.100	30.400
B25		38,2	31,2	30.500	37.600	40.800
B45		54,7	44,6	33.000	41.700	43.800
B95		106,9	98,3	41.700	50.500	50.800
B25w	Wasser- gelagert	37,9	27,7	28.600	40.100	42.400
B45w		56,6	43,9	33.500	41.100	43.800
B95w		111,9	99,5	42.200	50.600	51.000

Zusätzlich wurde im Alter von 28 Tagen die Zylinderdruckfestigkeit, statischer und dynamischer E-Modul an den zylindrischen Probekörpern ($\varnothing \sim 100$ mm und Höhe ~ 300 mm) ermittelt. Die Mittelwerte sind in *TABELLE 3* aufgeführt, die Einzelergebnisse befinden sich im *ANHANG A5*.

4.2 Vorversuche

Im Vorfeld der Ermüdungsuntersuchungen wurden für die Festlegung der Prüfmethodik und die Versuchsdurchführung relevante Einflüsse kontrolliert und die Erkenntnisse in das Versuchsprogramm integriert.

4.2.1 Veränderung der mechanischen Eigenschaften von druckschwellbeanspruchtem Beton

Zu Beginn der Untersuchungen wurde geprüft, welcher mechanische Kennwert – die Festigkeit oder das Verformungsverhalten – am ausdrucksstärksten auf den ermüdungsbedingten Schädigungsprozess reagiert.

An rund 80 Probekörpern der Betonfestigkeitsklassen B 25 und B 45 wurden Restfestigkeits- und Reststeifigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Die Betonprobekörper wurden durch eine reine Druckschwellbeanspruchung, mit der Frequenz von 5 Hz, einer Unterspannung von rund 2 MPa und einer Oberspannung zwischen $\sim 0,57 \beta_c$ und $\sim 0,79 \beta_c$ dynamisch geschädigt. Die Ergebniswerte zu der Untersuchungsreihe befinden sich in der *TABELLE 4*.

Tabelle 4: Ergebniswerte - Änderung der mechanischen Eigenschaften nach einer Druckschwellbeanspruchung, B 25, B 45

	$\frac{n}{N}$ [/]	$\frac{E_{dyn,EnI,N}}{E_{dyn,EnI,0}}$ [/]	$\frac{E_{dyn,US,N}}{E_{dyn,US,0}}$ [/]	$\frac{E_{stat,N}}{E_{stat,0}}$ [/]	$\frac{\beta_{c,N}}{\beta_{c,0}}$ [/]	
B25	0,64 β_c	0,06	0,81	0,82	0,80	0,98
		0,10	0,81	0,86	0,70	1,02
		0,70	0,68	0,74	0,54	0,95
		0,43	0,75	0,79	0,62	1,00
		0,89	0,63	0,70	0,47	0,95
		0,65	0,73	0,79	0,64	1,01
		0,50	0,77	0,77	0,64	1,05
	0,57 β_c	0,04	0,72	---	0,62	1,03
		0,50	0,62	0,72	0,49	0,97
		0,08	0,76	0,79	0,66	1,04
B45	0,79 β_c	0,80	0,83	0,86	0,75	0,99
		0,52	0,85	0,87	0,81	0,97
		0,88	0,76	0,82	0,68	0,91
		0,26	0,85	0,90	0,80	1,02
		0,10	0,88	0,91	0,92	1,05
		0,07	0,88	0,91	0,88	0,98
		0,99	0,73	0,84	0,65	0,77
	0,71 β_c	0,70	0,77	0,82	0,67	0,99
		0,98	0,75	0,77	0,68	0,89
		0,50	0,82	0,84	0,75	1,02
		0,98	0,70	0,81	0,70	0,79
		0,58	0,79	0,79	0,70	0,92
		0,60	0,80	0,83	0,66	0,91
		0,08	0,86	0,88	0,84	1,02
		0,22	0,86	---	0,82	0,99
		0,07	0,84	0,86	0,84	1,04
		0,20	0,85	0,87	0,86	1,00

Nach Sichtung der Literatur haben sich bislang nur *MEMEL UND KERN* [64] direkt mit der Restfestigkeit von druckschwellbeanspruchtem Beton befasst. Sie stellten bei Bruchversuchen, an zuvor druckschwellbeanspruchten zylindrischen Probekörpern, eine bis zu 20 % höhere Festigkeit fest, als bei vergleichbaren unbeanspruchten Probekörpern. Die Ermüdungsversuche begannen im Alter von 28 Tagen und dauerten größtenteils bis zu zehn Tagen. Der Festigkeitszuwachs in diesem Prüfalter kann auch durch die alterungsbedingte mechanische Eigenschaftsveränderung erfolgen. Über den zeitlichen Verlauf der Eigenschaftsänderungen und über weitere Randbedingungen wurde keine Aussage gemacht. Die Festigkeitszunahme wurde mit dem Abbau lokaler Störungen durch Spannungumlagerungen begründet. Über den zeitabhängigen Verlauf der Betonsteifigkeit sind keine Aussagen zu finden.

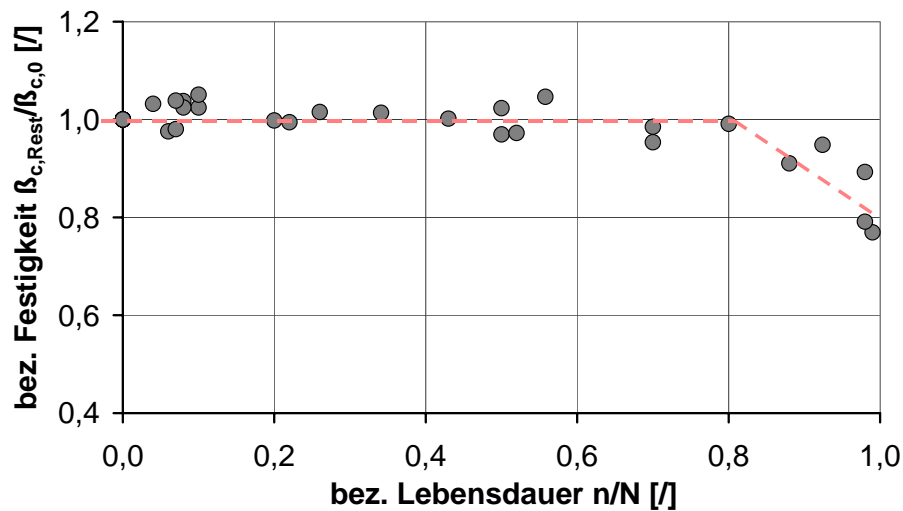


Abbildung 27: Festigkeitsverlauf über die Lebensdauer (B 25 und B 45)

Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen zeigten, dass die Festigkeit kein geeigneter Kennwert für die Betonermüdung und Lebensdauerbestimmung ist. In *ABBILDUNG 27* ist der Verlauf der Restfestigkeiten über die Lebensdauer dargestellt. Es konnte bis kurz vor dem Versagen des Betons - bis zum Ende der Phase II ($\sim 0,8 \cdot N$) - keine wesentliche Veränderung der Festigkeit beobachtet werden. Die Festigkeiten schwankten zwischen $0,91 \beta_{c,0}$ und $1,05 \beta_{c,0}$, was im Streubereich der Betondruckfestigkeitsprüfung liegt. Zum Versagen hin, ab der Phase III ist ein tendenzieller Abfall der Restfestigkeiten auf rund $0,77 \beta_{c,0}$ ersichtlich. Der Festigkeitsverlauf des dynamisch beanspruchten Betons ist demnach weitestgehend unabhängig von der Betonfestigkeitsklasse.

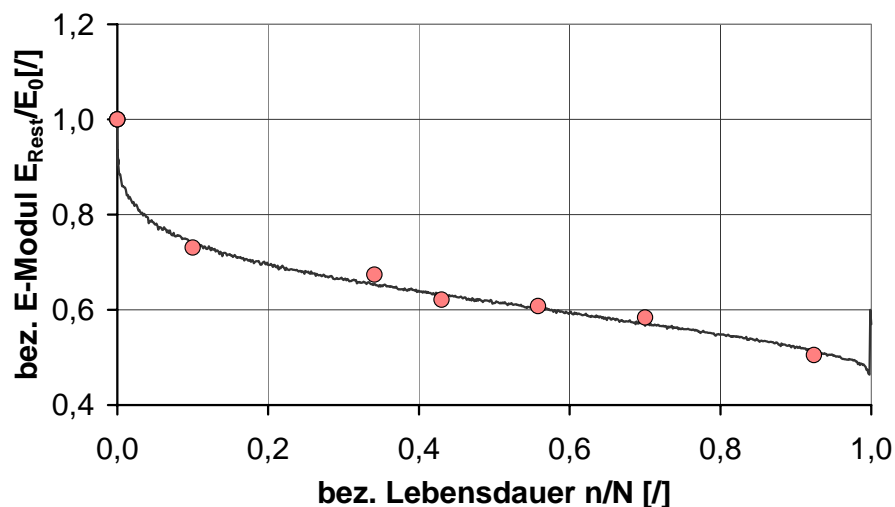


Abbildung 28: Steifigkeits-Abminderung mit steigender Lebensdauer (B 25)

Als ausdrucksstärker Kennwert für eine Ermüdung zeigte sich die Verformungs- bzw. Steifigkeitsänderung. Die Betrachtung der Steifigkeit über die Lebensdauer in Form des bez. E-Moduls (ABBILDUNG 28) ergibt einen anfänglich rapiden und im Anschluss kontinuierlichen linearen Abfall, welcher aufgrund der Proportionalität und der Restfestigkeitskonstanz bis Phase III vergleichbar mit dem Verlauf der Dehnungszunahme bei Ermüdungsversuchen ist (SIEHE KAPITEL 3.5, SEITE 8, ABBILDUNG 8). Aufgrund dieser Erkenntnisse, dass sich der Schädigungsprozess durch eine definierte Ermittlung der Verformbarkeit beobachten lässt, wurden die nachfolgende Diskussionsgrundlage und die Ermüdungsdarstellungen darauf aufgebaut.

4.2.2 Betonsteifigkeit während der Ermüdungsversuche

Während der Ermüdungsversuche wurde die Betonsteifigkeit wiederholt ermittelt und wird nachfolgend als Verformungsmodul D bezeichnet.

Der Verformungsmodul D ergibt sich direkt aus der Spannungs-Dehnungslinie, als Sekantensteigung der Minimal- und Maximal-Spannungs-Dehnungswerte (ABBILDUNG 29) einer in die dynamische Beanspruchungsprozedur eingebetteten statischen Beanspruchungsrampe (SIEHE AUCH KAPITEL 4.4.3, SEITE 27).

Um zu überprüfen, welche Differenzen sich durch die unterschiedliche Ermittlung der Betonsteifigkeit zwischen der genormten E-Modulprüfung und der hier durchgeführten Methode ergeben, wurde der statische E-Modul vorab sowohl nach DIN 1048 Teil 5 als auch direkt aus der Spannungs-Dehnungslinie eines kraftgeregelten statischen Bruchversuches mit gleichzeitiger Längsverformungsmessung - im weiteren als „s-e-Methode“ bezeichnet - ermittelt. Für die Auswertung wurde dabei das erste Drittel der Spannungs-Dehnungslinie herangezogen. Die Belastungsgeschwindigkeit lag jeweils bei rund $0,5 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$.

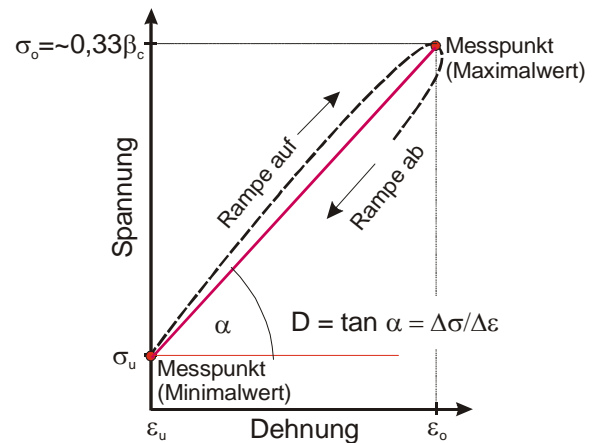


Abbildung 29: Ermittlung des Verformungsmoduls D direkt an der Spannungs-Dehnungslinie

Die Untersuchung ergab, dass die nach Norm ermittelten E-Moduln rund 3 % (28 Tage-Prüfung) und bei einem Jahr altem Beton sogar nur rund 0,7 % größer waren, als die nach der s-e-Methode. Die Differenz der E-Modulwerte liegt im Streubereich. Demnach lässt sich der E-Modul vergleichbar nach der s-e-Methode ermitteln.

4.2.3 Einfluss der Schwingungsunterbrechung (s-e-Messung)

Die eingefügte Verformungsmodul-Ermittlungsrampe (ABBILDUNG 30, SEITE 27) stellt eine kurzzeitige Schwingbeanspruchungspause mit geringer Beanspruchungshöhe dar, welche sich nach dem Stand der Erkenntnisse [21][41][42][44] auf das Ergebnis der Bruchlastspielzahl auswirken kann. Diesbezügliche Untersuchungen ergaben eine Abweichung der ermittelten Bruchlastspielzahlen $\log N$ im Bereich von 1,5 % bis 5,0 %. Die Rampe kann somit als eine unbedeutende Ruhephase der dynamischen Beanspruchung angesehen werden. Sie ist aber für die weiteren Ermüdungsversuche ohne Belang, da sie mit gleichen festgelegten Prozeduren durchgeführt wird und damit keinen nennenswerten Einfluss auf die Vergleichbarkeit der Ergebniswerte hat.

Weitere Vorversuche zeigten eine starke Abhängigkeit der ermittelten Ergebnisse von der Versuchsprozedur, sowie der äußeren und maschinellen Einflüsse. Wichtig für vergleichbare Ermüdungsversuche sind daher gleichbleibende Randbedingungen bei der Durchführung.

4.2.4 Überlegungen zur Wahl der Prüfmethodik bei Schwingversuchen

Bei statischen Druckprüfungen differieren die einzelnen Bruchfestigkeiten und Bruchdehnungen, selbst wenn die Betone aus der gleichen Mischung stammen. Für die Ermüdungsuntersuchungen ergibt sich daher die Problematik, dass die tatsächliche Festigkeit des zu prüfenden Probekörpers nicht exakt bekannt ist und somit nicht das tatsächliche Verhältnis der Oberspannung bezogen auf die Bruchspannung gewählt werden kann.

Um Aufschluss über die zu erwartenden Streuungen der verwendeten Betonmischungen zu erlangen, wurden Druckfestigkeitsprüfungen mit gleichzeitiger Längsdehnungsmessung an den in den Hauptversuchen verwendeten Betonen durchgeführt.

Es gilt eine Methode auszuwählen, bei der die Beanspruchung möglichst nahe an dem tatsächlichen Wert des jeweiligen Probekörpers liegt. Um in die Nähe dieses „wahren“ Wertes zu gelangen, lassen sich verschiedene Wege einschlagen.

Eine Möglichkeit führt über die vorangehende Bestimmung der mittleren Festigkeit. Eine andere Möglichkeit ist die Betrachtung der mittleren Bruchdehnung, um dem zu prüfenden Probekörper eine bestimmte Verformung aufzuzwingen und die sich dabei ergebende Kraft als Oberspannung bei der Schwingbeanspruchung zu verwenden. Um festzustellen, welche der beiden Prüfungsarten für die geplanten Untersuchungen günstiger ist, sind in Versuchsreihen beide Methoden verglichen worden.

Es zeigte sich, dass der Variationskoeffizient der Bruchfestigkeit der einzelnen Mischungsreihen für die Festigkeitsklasse B25 lediglich zwischen 0,9 % und 4,5 % und der der Bruchdehnung zwischen 0,8 % und 13 % lag.

Bei der Betrachtung aller für die Festigkeitsklasse B25 verwendeten Versuchsmischungen – unter Einschluss unterschiedlicher Rezepturen – kehrt sich das Ergebnis um. Der ermittelte Variationskoeffizient für die Bruchfestigkeit beträgt dann 10,6 % und der der Bruchdehnung nur 8,7 %.

Für die Ermüdungsversuche wurde die Zylinderdruckfestigkeit der jeweiligen Mischungsserie als Bezugswert der Oberspannung verwendet.

4.3 Versuchsprogramm der Ermüdungsversuche

Das Versuchsprogramm wurde auf die Erkenntnisse der Vorversuche ausgerichtet. In die sinusförmige Druckschwellbeanspruchung wurde eine Rampen-Prozedur eingegliedert (*SIEHE VERSUCHSDURCHFÜHRUNG KAPITEL 4.4.3, SEITE 27*), um während der zyklisch-mechanischen Beanspruchung die zeitliche E-Modul- bzw. Vorformungsmodul-Änderung beobachten zu können und um auf dieser Grundlage eine Abschätzung der Bruchlastspielzahl zu entwickeln (*SIEHE KAPITEL 4.2.2, SEITE 24*). Vor der Schwingbeanspruchung wurden die mechanischen Betonkennwerte, Anfangssteifigkeit und Festigkeit der Prüfserie ermittelt, um Zusammenhänge zwischen den mechanischen Ausgangskennwerten und der Lebensdauer zu ermitteln.

Zudem wurden Probekörper durch zyklisch-mechanische Beanspruchungen und statisch-mechanische Dauerstandbeanspruchungen, vergleichbar mit den Vorversuchen in *KAPITEL 4.2.1, SEITE 22*, vorgeschädigt und im Anschluss in Bruchversuchen die Restfestigkeit und Reststeifigkeit ermittelt.

Zusätzlich wurde während der statischen Bruchversuche die zeitliche Veränderung der Ultraschalllaufzeit gemessen (*SIEHE VERSUCHSDURCHFÜHRUNG KAPITEL 4.4.6, SEITE 29*), um aufgrund der Unterschiede im Rissverlauf von statisch und zyklisch-mechanisch vorbeanspruchtem Beton auf die Art der Vorschädigung - statisch oder zyklisch-mechanisch - zu schließen.

Diese Versuche einschließlich der Vorversuche umfassten 35 Mischungen unterschiedlicher Betonart und -festigkeitsklasse (*SIEHE KAPITEL 1.1, SEITE 20*). Insgesamt beinhalten die Versuchsreihen ca. 1.000 zylindrische Probekörper und ca. 50 weitere alte vorhandene Probekörper unterschiedlicher Form und Festigkeit. Von diesen kamen ein großer Anteil für die Ermüdungsversuche zur Anwendung.

Die Randbedingungen der Ermüdungsversuche wurden variiert (*SIEHE KAPITEL 4.3.2*) und die Auswirkungen der Einflussfaktoren auf die Bruchlastspielzahl, Beanspruchungshöhe, Betonsteifigkeit, Ruhephasen in der Beanspruchung, Beanspruchungsfrequenz und Betonfeuchtigkeitsgehalt untersucht.

Nach der Bestimmung der Zylinderdruckfestigkeit der jeweiligen Betonserie wurden die Probekörper zwischen $0,50 \beta_C$ und $0,87 \beta_C$ druckschwellbeansprucht. Die Beanspruchungsfrequenz lag dabei zwischen 0,1 Hz und 20 Hz. Eine Versuchsreihe wurde in der Regel mehrmals wiederholt, bis sichere Ergebniswerte vorlagen. Die einzelnen Versuche sind im ANHANG A7 aufgelistet.

Für die Ermüdungsversuche wurde ein Prüfalter der Probekörper von mindestens 100 Tagen gewählt. Die Festigkeits- und Verformungsentwicklung ist nach der Lagerungsdauer weitestgehend abgeschlossen und die Feuchtigkeitsverteilung über den Probekörperquerschnitt ist hinreichend ausgeglichen. Um die Ermüdungsversuche in einem übersehbaren Zeitraum durchzuführen und die Schadensbilder mit vielen Versuchen untermauern zu können, wurde eine „scharfe“, den Beton stark und somit auch schnell schädigende Druckschwellbeanspruchung gewählt. Die Beanspruchungshöhe, d.h. die Oberspannungen wurden in Schritten von der Bruchfestigkeit abwärts gewählt.

4.3.1 Druckschwellversuche

Die für die Dauerschwingversuche charakteristischen variablen Kenngrößen sind die Oberspannung σ_o , Unterspannung σ_u sowie Lastspielfrequenz f_n . Die Dauerschwingversuche beschränkten sich auf Schwellversuche im Druckbereich.

Es wurden verschiedene Versuchsreihen durchgeführt, die sich in Oberspannung σ_o und Lastspielfrequenz f_n und damit auch in der Spannungsamplitude und Belastungsgeschwindigkeit unterscheiden. Die Unterspannung σ_u wurde konstant bei ~ 2 MPa gehalten, welche die maschinenbedingt kleinstmögliche erreichbare Druckspannung bei schneller dynamischer Beanspruchung darstellt. Die gewählten unterschiedlichen Oberspannungen σ_o bezogen sich auf die momentane Zylinderfestigkeit der verwendeten Betone.

Als Lastspielfrequenz f_n der sinusförmigen Beanspruchung wurden vorgesehen $f_n = 0,1$ Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz und 20 Hz.

Die Wahl der Werte bis 10 Hz orientierte sich an den Untersuchungen von *GRAF UND BRENNER* [37] (Frequenzen zwischen 0,83 Hz bis 8,33 Hz), *MEHMEL* [63] (0,5 Hz und 1,5 Hz), *GAEDE* [32] (11 Hz) und *KERN* [64] (6,33 Hz). Die Lastspielfrequenz 20 Hz stellt nach dem Erkenntnisstand der gesichteten Arbeiten eine Neuerung bei Druckschwellbeanspruchung dar. Die Wahl noch höherer Frequenzen (bis zu 80 Hz), wie sie beispielsweise an Brückenbauwerken zu messen sind, war maschinen-technisch nicht möglich.

Ein wesentlicher Unterschied zu den bisherigen dokumentierten Untersuchungen stellt die kontinuierliche Messung der Verformungen dar. Bislang wurden die durch die dynamische Beanspruchung auftretenden maximalen und minimalen Dehnungen ermittelt und diskutiert. In diesem Versuchsprogramm wird der Verformungsmodul D (*SIEHE KAPITEL 4.2.2, SEITE 24*) kontinuierlich ermittelt.

Die Oberspannungen der Rampe wurden aus den im Vorfeld durchgeführten Druckfestigkeitsprüfungen an zylindrischen Probekörpern (Alter > 100 Tage) in Abhängigkeit der Festigkeitsklasse festgelegt und entsprechen im Mittel rund 33 % der Druckfestigkeiten. Sie lagen beim Beton der Festigkeitsklasse B 25 bei 10,5 MPa, beim B 45 bei 17,5 MPa und beim B 95 bei 35,1 MPa.

4.3.2 Dauerstandversuche

Neben den Druckschwellversuchen wurden ergänzend an normalfestem Beton B 25, B 45 und hochfestem Beton B95 Dauerstandversuche auf einem Dauerspannungsniveau von $\sim 0,30 \beta_C$ bis $\sim 0,95 \beta_C$ durchgeführt. Ermittelt wurde die maximale Gesamtlängsverformung und die Beanspruchungszeit bis zum Materialversagen oder bis zum Versuchsende, zur Entlastung nach 90 Tagen.

4.4 Versuchsdurchführung

Vor Prüfungsbeginn wurden bei allen Probekörpern (ca. 1000 Probekörper) die dynamischen E-Moduln $E_{\text{dyn,EnI}}$, $E_{\text{dyn,US}}$ sowie Masse und Rohdichte ermittelt. Zu Beginn einer Prüfserie wurde der statische E-Modul und die Zylinderdruckfestigkeit bestimmt, um Ausgangswerte für die folgenden Dauerschwing- bzw. Dauerstandsversuche für die jeweilige Probekörperserie zu erhalten.

Die Zylinderfestigkeit und der statische E-Modul wurden mittels eines statischen Bruchversuches mit gleichzeitiger Längsverformungsmessung ermittelt.

4.4.1 Zerstörungsfreie Prüfungen

Der dynamische E-Modul wurde nach Heft 422 des DAfStb [13] mit Hilfe der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung (EnI) und der Ultraschall-Laufzeitmessung (US) ermittelt. Die Prüfungen der Eigenschwingzeit nach Impulsanregung erfolgten mit dem Gerät „Grindo-Sonic“ MK5i und die der Ultraschall-Laufzeitmessung mit einem Pundit-Ultraschall-Messgerät.

4.4.2 Statische Prüfungen

Statische Versuche zur Bestimmung von Druckfestigkeit und statischer E-Modul wurden an einer zweisäuligen Hydralischen-Universal-Schwingprüfmaschine der Klasse 1, der Firma MFL, Typ HUS 160 (*ANHANG A1, BILD 1*) durchgeführt. Diese Prüfmaschine ist für Kraft-, Weg- und Verformungsregelung geeignet. Die maximale Druck- oder Zugkraft beträgt 1,6 MN. Zur Anpassung auf die zu erwartenden Festigkeiten können verschiedene Messbereiche mit Maximalkräften in Höhe von 800 kN, 320 kN oder 160 kN angewählt werden.

Der statische E-Modul wurde im Zuge der Zylinderdruckfestigkeitsprüfungen direkt aus der Aufzeichnung der Spannungs-Dehnungslinie bestimmt. Auf die Wartezeiten und zweimalige Vorbeanspruchung, wie in DIN 1048 Teil 5, beschrieben, wurde verzichtet. Die Beanspruchungsgeschwindigkeit betrug rund $0,5 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Die Längenänderung wurde bei den zylindrischen Probekörpern unter Verwendung von Wegaufnehmern vom Typ DD1 des Herstellers HBM mit einem Messbereich von $\pm 2,5 \text{ mm}$ aufgezeichnet. Die Messlänge betrug 100 mm, die Auflösung betrug 0,1 mm bzw. 0,05 mm.

4.4.3 Ermüdungsversuche

Die zyklisch-mechanischen Beanspruchungen wurden an einer Vier-Säulen-Prüfmaschine mit hydraulischem Antrieb der Klasse 1 und einer rechnergesteuerten elektronischen Regeleinrichtung der Firma MTS durchgeführt. Die Prüfmaschine ist im *ANHANG A1, BILD 2* dargestellt. Die maximale Kraft der Prüfmaschine in Zug- und Druckrichtung beträgt 1,0 MN. Die Messwerterfassung geschah mit Hilfe eines Rechners. Die Abfragerate der Daten beträgt maximal 5 kHz.

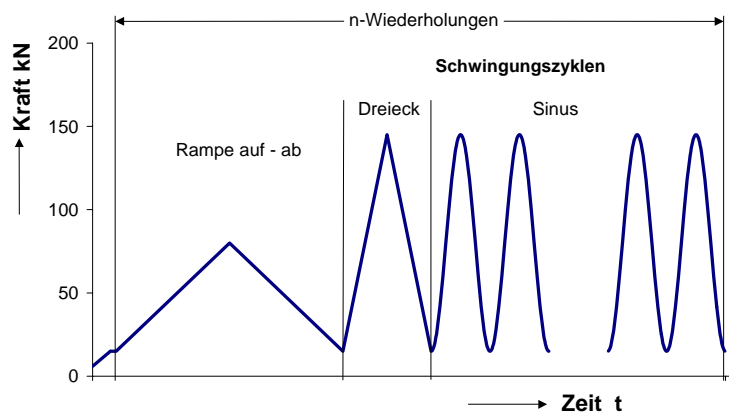


Abbildung 30: Schematische Abfolge der Beanspruchung für B25

Die Dauerschwingversuche wurden nach der Prüfprozedur, die schematisch in *ABBILDUNG 30* dargestellt ist, gefahren. Die Regelungsprozedur beginnt mit der Belastungs- und Entlastungs-Rampe, an der der Verformungsmodul D gemessen wird. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug ca. $1,0 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Danach schließt sich eine mit $2.000 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ gefahrene Dreiecksfunktion und daran eine sinusförmige Schwingbeanspruchung an. Die Dreiecksfunktion wurde aus messtechnischen Gründen eingefügt. Die gemessenen Endwerte sind exakter und definierter als bei der nachfolgenden Sinusfunktion. Verformungsmessungen fanden während der Dreiecksfunktion bei minimaler, mittlerer und maximaler Spannung statt. Während der sinusförmigen Schwingung wurden wiederholt Verformungsmessungen bei minimaler und maximaler Spannung durchgeführt.

Die Belastungsgeschwindigkeit ist abhängig von Frequenz und Spannungsamplitude und lag zwischen $3.300 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ und $56.800 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$.

Bis zu 2.500 Schwingungszyklen wiederholt sich diese Abfolge, Rampe-Dreieck-Sinusschwingung jeweils nach 100 Sinusschwingungen. Nach 2.500 Schwingungszyklen wiederholt sich die Abfolge, Rampe-Dreieck-Sinusschwingung erst nach 2.500 Sinusschwingungen und endet durch Materialversagen.

Die Verformung wurde bei den Probekörpern mit Hilfe von drei Wegaufnehmern der Firma MTS mit einem Messbereich von $\pm 2,5 \text{ mm}$ und einer Messlänge von 100 mm ermittelt. Die Messungen bei dynamischer Prüfung fanden im kalibrierten $0,1 \text{ mm}$ -Messbereich statt.

4.4.4 Ermüdungsversuche mit Ruhephase

In einer Versuchsreihe einer Mischungsserie der Festigkeitsklasse B45 wurde der Einfluss von Ruhephasen untersucht. Dazu wurde in die Beanspruchungsprozedur (*ABBILDUNG 30*) nach der Rampe der Verformungsmodul-Messung ein neuer Prozedurteil, eine Ruhephase (im Bild mit „Halt“ gekennzeichnet), eingegliedert (*ABBILDUNG 31*). Die Dauer der Ruhephase lag zwischen 0 und 120 Minuten.

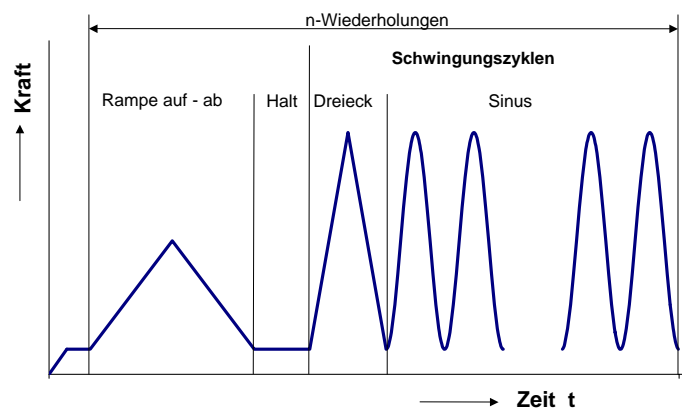


Abbildung 31: schematische Darstellung der Beanspruchungsfunktion mit Ruhephase

4.4.5 Dauerstandsversuche

Die Dauerstandsversuche wurden an einem Dauerprüfstand (*ANHANG A1*, Bild 3) und einer rechnergesteuerten Vier-Säulen-Prüfmaschine (*ANHANG A1*, *BILD 4*) der Klasse 1, mit einer Maximalkraft 5 MN mit hydraulischem Antrieb und elektronischer Regeleinrichtung der Firma MTS durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug ca. $1,0 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Die Aufzeichnung der Kriechverformung erfolgte in zeitlichen Abständen. Die Versuchsreihe endete, wenn der Probekörper unter der aufgetragenen Dauerlast versagte oder die Standdauer von 90 Tagen erreicht wurde. Bei nicht zu Bruch gekommenen Probekörpern wurde anschließend, einen Tag nach Entlastung, der dynamische und statische E-Modul sowie die Restfestigkeit ermittelt.

4.4.6 Zerstörungsfreie Beobachtung der Betonerermüdung

Im Rahmen der Untersuchungen wurden in einigen Versuchsreihen neben den Längsverformungsmessungen mit Hilfe von Wegaufnehmern auch die Ultraschall-Laufzeitänderungen während der Betonerermüdung und der statischen Bruchversuche ermittelt (*BILD 5, ANHANG A1*). Die Betonprobekörper wurden mittig senkrecht zur Beanspruchungsrichtung während des Versuches kontinuierlich durchschallt und die Ergebniswerte rechnergestützt protokolliert.

Die Ultraschall-Laufzeitmessung erfolgte mit Hilfe eines mobilen Pundit-Ultraschall-Messgerätes mit Datenerfassungsanlage (*ANHANG A1, BILD 6*). Die Laufzeitauflösung betrug $0,1 \mu\text{s}$. Das Abfrageintervall der Laufzeit richtete sich nach der Länge des Versuches und lag zwischen einer Sekunde und vier Minuten. Die Messdaten wurden automatisch per Computer protokolliert.

Die Ankopplung und die gleichmäßige Anpressung der Ultraschallköpfe an den Probekörper erfolgte über zwei Metallschienen, durch Federn und zusätzliche Gummiringe. Als Kopplungsmittel zwischen Beton und Ultraschallköpfen wurde Vaseline verwendet.

4.5 Ergebnisse und Diskussion

4.5.1 Versuchsergebnisse

4.5.1.1 Ermüdungsversuche

In den folgenden Tabellen (TABELLE 5 BIS TABELLE 10) sind die Ergebnisse der Druckschwelluntersuchungen aufgelistet. Zur Erklärung sind in der Tabelle von links

- die Betonfestigkeitsklasse,
- die Beanspruchungsfrequenz f ,
- die auf die Betonfestigkeit bezogene Beanspruchungshöhe σ_o/β_c ,
- die Bruchlastspielzahl N ,
- die dynamischen E-Moduln, ermittelt mit Hilfe der Ultraschall-Laufzeitmessung $E_{dyn,US}$ und Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung $E_{dyn,Ent}$,
- der vor der Schwingbeanspruchung gemessene Verformungsmodul D_0 (SIEHE KAPITEL 4.2.1, SEITE 22),
- die zeitliche Änderung des Verformungsmoduls \dot{D} pro Sekunde in der Phase II (zwischen $0,3 \cdot N$ und $0,7 \cdot N$, ABBILDUNG 32) – je größer die zeitliche Änderung des Verformungsmoduls, desto geringer ist die erreichte Bruchlastspielzahl,
- die faktorielle Änderung x_w des Versagensmoduls beim Wendepunkt der Verformungsmodul-Lebensdauer-Linie (ABBILDUNG 32) und
- die faktorielle Gesamtänderung x_N des Versagensmoduls bis zum Versagen (ABBILDUNG 32)

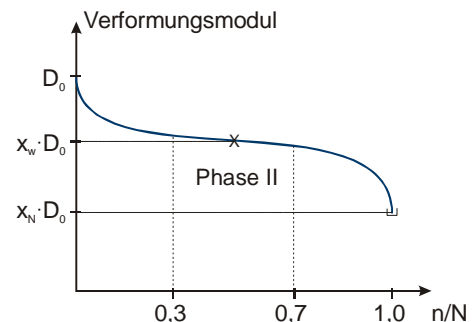


Abbildung 32: Charakteristische Ermüdungslinie

dargestellt. Die Werte stellen Mittelwerte dar und sind auf eine signifikante Stellenanzahl gerundet worden. Einige Werte konnten nicht sicher ermittelt werden und sind in der nachfolgenden Tabelle mit einem Strich (-) gekennzeichnet. Die Einzelwerte befinden sich im ANHANG A7.

Tabelle 5: Ergebniswerte der Ermüdungsversuche (Luftlagerung 20 °C / 65 % r. F., B 25)

Beton	Frequenz [Hz]	σ_o/β_c [l]	Bruchlastspielzahl N [l]	$E_{dyn,US}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent}$ [MPa]	D_0 -Modul [MPa]	\dot{D} [MPa/s]	D-Modul-Änderung (Wendepkt.) $x_w \cdot D_0$ [l]	D-Modul-Änderung (Versagenspkt.) $x_N \cdot D_0$ [l]
B 25	5	0,65	5.677.500	39.100	34.400	29.000	0,0017	0,515	0,605
	10	0,60	6.450.000	40.100	35.800	30.800	0,0000	0,000	0,000
	10	0,65	1.760.000	38.800	34.600	29.900	0,0079	0,469	0,616
	10	0,66	1.250.000	40.800	37.700	31.400	0,0054	0,467	0,600
	10	0,71	136.300	36.500	34.800	29.800	0,0520	0,494	0,681
	10	0,73	95.000	36.500	34.800	29.800	0,0520	0,494	0,681
	10	0,75	20.000	40.300	36.700	30.300	0,3541	0,604	0,706
	10	0,84	2.000	40.000	36.900	31.000	4,6370	0,558	0,696
	20	0,65	2.285.300	39.200	34.400	29.500	0,0030	0,500	0,626
	20	0,69	605.000	40.000	34.500	30.300	0,0120	0,438	0,638
	20	0,73	67.500	38.500	33.800	28.600	0,0972	0,544	0,770
	20	0,75	21.250	39.300	37.000	32.400	-	-	-
	20	0,83	6.900	39.800	38.100	-	-	-	-
	B 25 rec	10	0,66	285.000	28.500	25.700	21.600	0,0306	0,679
10		0,75	4.900	29.500	26.400	22.000	0,9183	0,760	0,827
10		0,84	300	28.700	25.600	20.700	14,9300	0,666	0,788
B 25 Jap	10	0,75	93.500	38.700	35.300	31.400	0,1900	0,539	0,673
	10	0,84	1.270	39.200	35.300	31.100	6,4700	0,617	0,707

Tabelle 6: Ergebniswerte der Ermüdungsversuche (Luftlagerung 20 °C / 65 % r. F., B 45, B 95)

Beton	Frequenz [Hz]	σ_c/β_c [l]	Bruchlastspielzahl N [l]	$E_{dyn,US}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent}$ [MPa]	D-Modul [MPa]	\dot{D} [MPa/s]	D-Modul-Änderung (Wendepkt.) $x_w \cdot D_0$ [l]	D-Modul-Änderung (Versagenspkt.) $x_N \cdot D_0$ [l]
B 45	0,1	0,79	4.130	45.300	42.200	36.500	1,6613	0,789	0,829
B45	1	0,60	2.150.000	45.000	40.300	-	-	-	-
B45	1	0,66	745.000	45.700	42.500	36.200	0,0051	0,405	0,651
B45	1	0,75	13.330	44.600	42.400	37.000	1,2248	0,740	0,830
B45	1	0,79	2.540	44.200	40.700	35.000	0,0290	0,737	0,831
B45	1	0,84	200	43.600	39.400	-	-	-	-
B 45	5	0,79	6.670	45.800	42.900	36.400	0,7462	0,789	0,836
B 45	10	0,59	1.268.330	45.600	42.200	35.500	0,0040	0,646	0,754
B 45	10	0,66	152.500	45.800	40.800	34.200	0,0349	0,658	0,779
B 45	10	0,67	81.670	46.100	43.500	35.000	0,0804	0,631	0,794
B 45	10	0,75	11.880	45.800	42.500	35.300	0,5276	0,753	0,835
B 45	10	0,84	1.300	45.400	42.400	35.000	2,6475	0,746	0,839
B 95	5	0,72	37.500	52.400	49.000	42.400	0,1548	0,790	0,866
B 95	5	0,78	10.000	49.500	50.000	40.000	0,6488	0,859	0,895
B 95	10	0,60	10.585.000	51.900	49.400	42.300	0,0004	0,736	0,780
B 95	10	0,66	62.500	50.000	48.900	41.600	-	-	-
B 95	10	0,72	41.670	51.100	49.600	41.600	0,1398	0,793	0,888
B 95	10	0,75	30.000	52.200	51.500	42.700	-	-	-
B 95	10	0,76	22.500	51.400	50.400	42.500	0,2206	0,742	0,872
B 95	10	0,84	2.430	51.300	50.600	42.000	-	-	-
B 95	10	0,87	1.250	50.600	49.000	41.200	5,5129	0,869	0,943

Tabelle 7: Ergebniswerte der Ermüdungsversuche (Wasserlagerung)

Beton	Frequenz [Hz]	σ_c/β_c [l]	Bruchlastspielzahl N [l]	$E_{dyn,US}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent}$ [MPa]	D-Modul [MPa]	\dot{D} [MPa/s]	D-Modul-Änderung (Wendepkt.) $x_w \cdot D_0$ [l]	D-Modul-Änderung (Versagenspkt.) $x_N \cdot D_0$ [l]
B 25	5	0,62	15.000	46.600	44.600	34.700	0,3797	0,675	0,548
B 25	5	0,70	1.800	46.300	44.400	33.800	3,3686	0,700	0,590
B 25	10	0,62	21.250	45.400	44.100	34.300	0,3558	0,512	0,683
B 25	10	0,70	2.300	45.800	43.100	33.900	3,1048	0,639	0,604
B 25	10	0,71	1.650	46.000	44.600	36.300	5,5790	0,524	0,682
B 25	10	0,75	770	45.300	43.800	33.500	12,7170	0,500	0,668
B 25	10	0,84	130	45.000	43.100	33.300	-	0,520	0,669
B 25	20	0,55	287.500	44.900	44.400	33.200	0,0220	0,475	0,668
B 25	20	0,62	22.500	46.100	43.700	33.900	0,3392	0,584	0,567
B 25	20	0,70	2.500	45.500	43.700	33.900	1,9197	0,605	0,700
B 45	1	0,79	100	49.000	48.600	36.400	85,4175	-	0,758
B 45	5	0,62	3.750	48.400	47.500	35.700	1,4394	0,726	0,803
B 45	5	0,70	1.200	47.900	47.100	36.400	5,6184	0,676	0,799
B 45	5	0,79	250	48.200	47.200	35.700	33,3368	0,700	0,809
B 45	10	0,54	72.500	48.100	46.300	35.500	0,0772	0,672	0,789
B 45	10	0,62	8.330	48.000	47.000	35.900	0,6784	0,695	0,779
B 45	10	0,70	1.730	48.000	46.600	35.900	4,5563	0,612	0,782
B 45	10	0,75	970	46.800	46.900	35.300	7,0127	0,658	0,778
B 45	10	0,79	500	48.400	47.100	35.900	17,0997	0,697	0,810
B 45	10	0,84	400	47.800	47.400	35.800	13,0402	0,706	0,806
B 95	10	0,66	33.130	49.400	52.400	43.500	-	-	-
B 95	10	0,69	17.500	50.400	53.100	42.700	0,2216	0,878	0,798
B 95	10	0,75	5.830	48.900	52.200	42.500	-	-	-
B 95	10	0,78	2.500	51.000	53.300	44.200	1,5576	0,924	0,886
B 95	10	0,84	1.470	-	-	43.400	-	-	-

4.5.1.2 Ermüdungsversuche mit Ruhephase

An Betonprobekörpern einer Mischung der Festigkeitsklasse B 45 wurde der Einfluss von Ruhephasen untersucht. In den folgenden Tabellen (*TABELLE 8* und *TABELLE 9*) sind die gemittelten und gerundeten Ergebniswerte der Druckschwellversuche mit integrierter Ruhephase zusammengefasst.

Tabelle 8: Ergebniswerte der Ermüdungsversuche mit integrierter Ruhephase (0,84 β_c , B 45)

Ruhephase [min]	Frequenz [Hz]	σ_o/β_c	N	$E_{dyn,US}$ [MPa]	$E_{dyn,Enl}$ [Mpa]	D_0 -Modul [MPa]
0	10	0,84	1.900	45.400	42.400	35.000
1	10	0,84	880	45.200	42.200	34.300
5	10	0,84	650	44.400	41.800	34.000
30	10	0,84	530	43.900	41.800	34.000
120	10	0,84	530	45.000	42.000	34.400

Tabelle 9: Ergebniswerte der Ermüdungsversuche mit integrierter Ruhephase (0,66 β_c , B 45)

Ruhephase [min]	Frequenz [Hz]	σ_o/β_c	N	$E_{dyn,US}$ [MPa]	$E_{dyn,Enl}$ [MPa]	D_0 -Modul [MPa]
0	10	0,66	165.370	43.700	40.800	-
1	10	0,66	237.500	46.100	41.500	35.000
5	10	0,66	375.100	44.000	40.800	-
30	10	0,66	405.000	44.100	41.800	-
120	10	0,66	409.000	44.300	41.800	34.800

4.5.1.3 Gesamtverformungen bei den Ermüdungsversuchen

Bei den Ermüdungsversuchen wurden die Gesamtverformungen bzw. maximalen Dehnungen ermittelt und in der *TABELLE 10* zusammengestellt. Die Werte stellen die mittleren Betonlängsdehnungen zum Zeitpunkt des Versagens ($n/N = 1,0$) dar.

Die Werte bei $\sigma_o/\beta_c = 1,0$ wurden mittels eines statischen Bruchversuches ermittelt und geben die zuletzt gemessene Dehnung vor dem Versagen wieder.

Tabelle 10: Maximale Dehnungen unter Druckschwellbeanspruchung

σ_o/β_c	Maximale Dehnungen [mm/m]					
	10 Hz					1 Hz
	B 25rec	B 25	B 25jap	B 45	B 95	B 45
1,00	2,48	2,57	2,38	2,43	2,52	2,43
0,87	-	-	-	-	2,56	-
0,84	2,48	2,62	2,42	2,52	-	2,60
0,81	-	2,40	-	-	-	-
0,79	-	2,31	-	2,02	-	2,11
0,77	-	-	-	-	2,30	-
0,75	1,80	2,20	2,21	1,87	-	1,97
0,72	-	-	-	-	2,26	-
0,69	-	2,40	-	-	-	-
0,66	1,96	3,35	2,62	2,04	-	2,50
0,60	2,35	3,85	3,50	2,80	-	3,56
0,50	-	-	-	-	3,70	-

4.5.1.4 Dauerstandversuche

Neben den Ermüdungsversuchen wurden ergänzende Dauerstandsversuche durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der *TABELLE 11* aufgelistet. Die Werte stellen Mittelwerte dar und sind auf eine signifikante Stellenanzahl gerundet worden.

Tabelle 11: Ergebnisse der Dauerstandversuche - maximale Bruchlaststandzeit bzw. maximale Gesamtdehnung

σ_o/β_c	B 25		B 45		B 95	
	Bruchlaststandzeit [s]	Dehnung ε_{ges} [mm/m]	Bruchlaststandzeit [s]	Dehnung ε_{ges} [mm/m]	Bruchlaststandzeit [s]	Dehnung ε_{ges} [mm/m]
1,00	50		97		200	
0,95	2350		198		270	
0,87	5400		2962		-	
0,85	-		4952		5172	
0,81		4,80		-		-
0,76		3,50		5,01		-
0,68		2,65		4,00		-
0,59		2,11		3,10		-
0,52		1,51		2,61		-
0,44		1,05		2,13		-
0,26		0,61		1,40		-

Die Ergebniswerte einer zusätzlichen Betrachtung der zeitlichen Veränderung der Festigkeit und des E-Moduls infolge hoher Dauerstandsbeanspruchung $\sigma_o = 0,95 \beta_c > \sigma_{krit}$ sind in *TABELLE 12* für die Betonfestigkeitsklasse B 25 zusammengefasst. Die Werte sind Mittelwerte aus mindestens drei Einzelwerten und wurden auf eine signifikante Stellenanzahl gerundet.

Tabelle 12: Ergebniswerte der Zeitstandsbeanspruchung (B 25)

	$\frac{t}{T}$	$\frac{E_{dyn,EnI,N}}{E_{dyn,EnI,0}}$	$\frac{E_{dyn,US,N}}{E_{dyn,US,0}}$	$\frac{E_{stat,N}}{E_{stat,0}}$	$\frac{\beta_{c,N}}{\beta_{c,0}}$
	[/]	[/]	[/]	[/]	[/]
0,95β_c, B25	0,93	0,80	0,84	0,71	0,92
	0,80	0,84	0,87	0,71	0,96
	0,75	0,86	0,92	0,73	0,97
	0,36	0,87	0,92	0,80	1,05
	0,25	0,88	0,91	0,85	1,04

4.5.2 Gesamtverformungen bei der Ermüdung

Ermüdungsbeanspruchungen verursachen je nach Betonart, Betonfestigkeitsklasse, Beanspruchungshöhe und Beanspruchungsgeschwindigkeit Gefügeschädigungen, d.h. Verformungen durch Rissöffnung und Werkstoffdehnung. Ein Beton versagt nach dem Überschreiten einer von der Beanspruchung abhängigen aufnehmbaren Gesamtverformung.

4.5.2.1 Beanspruchungshöhe

Bei der Betrachtung der ermittelten Versagensdehnungen ε_N (TABELLE 10, SEITE 32) ergeben sich in Bezug auf die Beanspruchungshöhe bei konstanter Beanspruchungsfrequenz von 10 Hz folgende Erkenntnisse (ABBILDUNG 33):

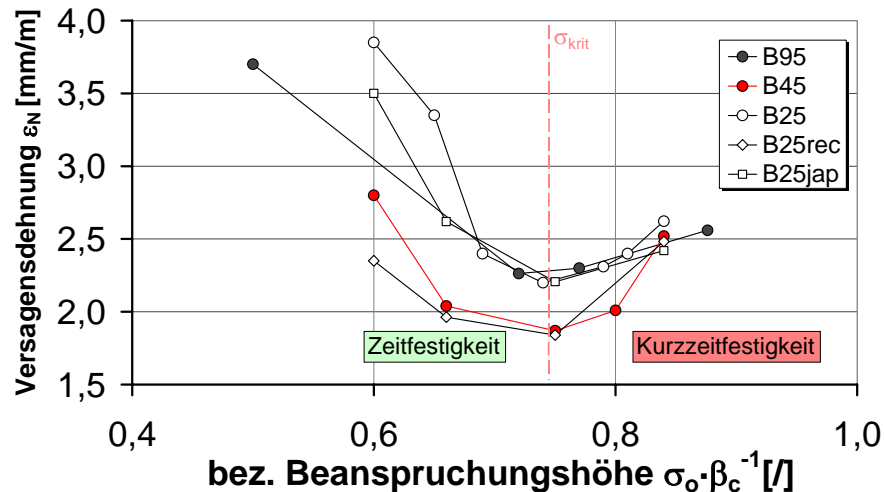


Abbildung 33: Maximale Ermüdungsdehnung (B 45)

- Mit zunehmender Oberspannung σ_o fällt die Längsdehnung von maximal 3,8 mm/m bei $\sigma_o \approx 0,60 \beta_c$ auf 1,8 mm/m - 2,2 mm/m bei der Beanspruchungshöhe von $\sigma_o \approx \sigma_{krit} \approx 0,75 \beta_c$ ab. Bei geringer Beanspruchungshöhe dominieren die aus der Ermüdung resultierenden Dehnungen. Es kommt mit fallender Beanspruchungshöhe zu einer feinen Verteilung der Mikrorisse im Gefüge. Die Verformungen durch Rissbildung ordnen sich unter. Der Beton zermürbt durch die zyklisch-mechanische Beanspruchung und versagt durch verteilte Gefügerisse. Der Dehnungsabfall ist aufgrund der hohen Belastungsgeschwindigkeiten bei der Schwingbeanspruchung und dem viskoelastischen Verhalten von Beton nachvollziehbar.
- Im Übergangsbereich zur Kurzzeitschwingfestigkeit bei rund $0,75 \beta_c$ bis $0,84 \beta_c$ steigt die Versagensdehnung bis rund 2,5 mm/m wieder an. In diesem Bereich kommt es direkt zu verstärkten vertikalen Rissbildungen. Die ermittelten Bruchdehnungen resultieren überwiegend aus Verformungen infolge von Rissöffnung und Risswachstum. Dehnungen spielen in diesen Beanspruchungsbereichen nur eine untergeordnete Rolle. Der Wiederanstieg der Dehnung ist durch den veränderten Schädigungsmechanismus zu erklären. Der Beton versagt nicht durch feinverteilte Risse sondern durch die Rissöffnung grober Axialrisse (ABBILDUNG 66, SEITE 55). Die dadurch entstehenden Betonsäulen sind weiterhin tragfähig. Durch die Vertikalrisse kommt es zu einer Erhöhung der Querverformung und demzufolge zur Erhöhung der Längsdehnung. Eine Steigerung der Oberspannung und damit der Beanspruchungsgeschwindigkeit verstärkt die Axialrissbildung und die Tragfähigkeit im Beton, was zu einer Zunahme der Versagensdehnung durch reine Gefügeverformungen führt.

Bei geringen Beanspruchungshöhen unter $\sim 0,60 \beta_c$ ist zu vermuten, dass die Dehnungen weiter ansteigen und dass ab einer bestimmten Beanspruchungshöhe das Risswachstum infolge der Ermüdungsbeanspruchung nahezu zum Erliegen kommt. Könnte ein Grenzwert nachgewiesen werden, wäre dieser mit einer Dauerschwingfestigkeit gleichzusetzen.

4.5.2.2 Frequenz

Eine Verringerung der Beanspruchungsfrequenz hat einen Anstieg der maximalen Dehnung im Gebrauchsbereich zur Folge. Die maximale Dehnung beträgt beim B 45 bei einer Beanspruchungshöhe von ca. $0,60 \beta_c$ und einer Beanspruchungsfrequenz von 10 Hz im Mittel rund 2,80 mm/m. Bei geringerer Frequenz (= 1 Hz) erhöht sich die maximale Dehnung auf rund 3,56 mm/m (ABBILDUNG 34).

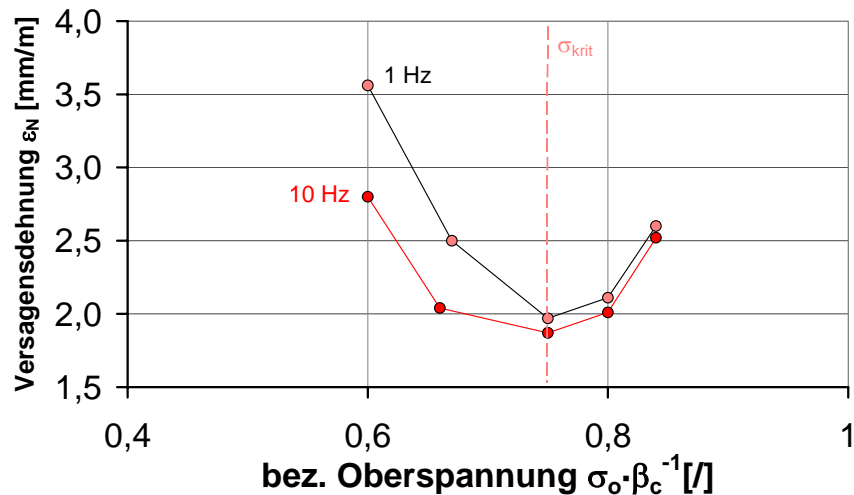


Abbildung 34: Frequenzeinfluss auf die Versagensdehnung (B 45)

In ABBILDUNG 35 sind die maximalen Dehnungen über dem Beanspruchungsfrequenzbereich von 0,01 Hz bis 20 Hz aufgetragen. Mit fallender und steigender Frequenz nähern sich die jeweiligen Versagensdehnungen asymptotisch einem Dehnungswert an. Die Versagensdehnung steigt bei dem untersuchten Beton der Festigkeitsklasse B45 von rund 1,9 mm/m bei 10 Hz (bzw. 20 Hz) auf rund 2,3 mm/m bei 0,1 Hz (bzw. 0,01 Hz). Sie nimmt damit bei einer Beanspruchungshöhe von $0,75 \beta_c$ in einem Bereich von 0,1 Hz und 10 Hz mit steigender Frequenz ab.

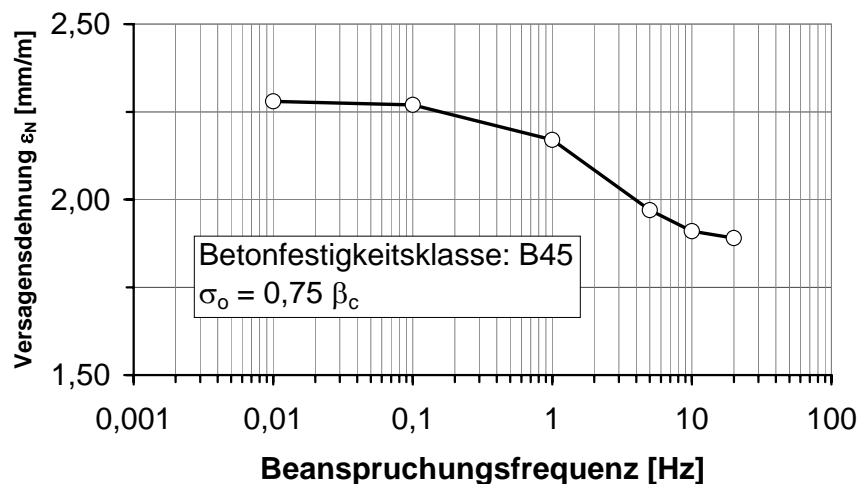


Abbildung 35: Frequenzabhängige Änderung der Bruchdehnung (B 45)

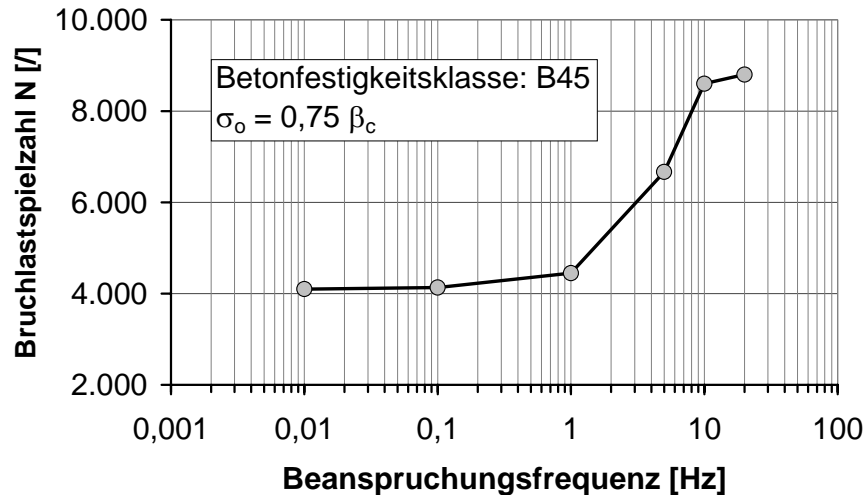


Abbildung 36: Frequenzabhängiger Anstieg der Bruchlastspielzahl (B 45)

Der Frequenzeinfluss ist demnach nur in einem Bereich von ca. 0,1 Hz bis ca. 10 Hz wirksam. Höhere und geringere Frequenzen ergeben gleiche Bruchdehnungen und demzufolge ähnliche Bruchlastspielzahlen (Abbildung 36).

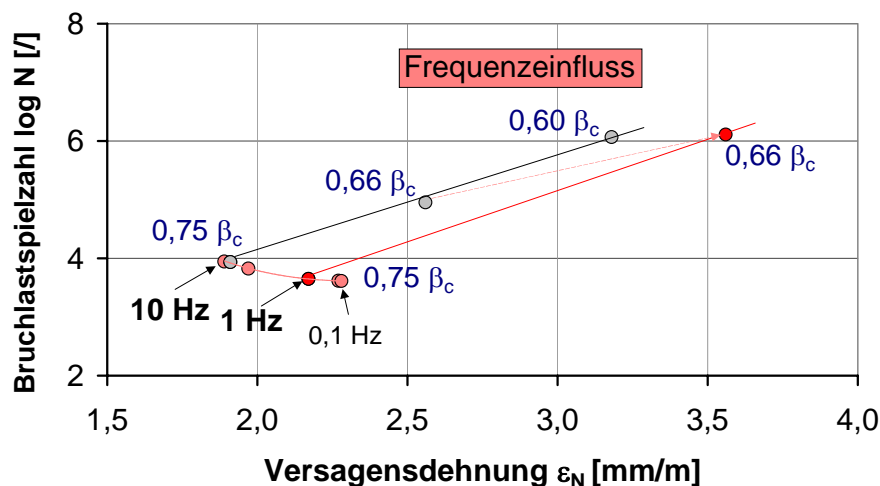


Abbildung 37: Frequenzeinfluss auf Bruchlastspielzahl und Versagensdehnung (1 Hz und 10 Hz, B 45)

In *ABBILDUNG 37* ist für 10 Hz und 1 Hz (0,1 Hz) die Bruchlastspielzahl $\log N$ über der Versagensdehnung ε_N in einem Beanspruchungsbereich von $0,75 \beta_c$ bis $0,60 \beta_c$ dargestellt. Die Regressionsgeraden der 1 Hz - und 10 Hz - Frequenzbeanspruchung weisen einen nahezu parallel verschobenen Verlauf auf. Die Verschiebung der einzelnen Bruchlastspielzahl-Versagensdehnungspunkte bei Frequenzänderung ist abhängig von der Beanspruchungshöhe. Die Bruchlastspielzahl nimmt bei einer Beanspruchungshöhe von $0,75 \beta_c$ mit kleiner werdender Beanspruchungsfrequenz ab, die Versagensdehnung nimmt zu. Bei geringerer Beanspruchung $\sim 0,66 \beta_c$ kehrt sich der Einfluss der Frequenz auf die Bruchlastspielzahl um.

Bei $0,75 \beta_c$ und 10 Hz beträgt die ermittelte Versagensdehnung rund 1,9 mm/m und die Bruchlastspielzahl rund 8.600 Schwingungen ($\log N = 3,93$). Bei 1 Hz hingegen beträgt die Versagensdehnung rund 2,2 mm/m und die Bruchlastspielzahl rund 4.500 Schwingungen ($\log N = 3,65$). Die Dehnung steigt um ca. 0,3 mm/m an und die Schwingungszahl halbiert sich dabei fast.

Eine Beanspruchungshöhe von $0,66 \beta_c$ ergibt bei einer Frequenz von 10 Hz eine Versagensdehnung von rund 2,6 mm/m sowie eine Bruchlastspielzahl von rund 90.000 Schwingungen ($\log N = 4,95$) und bei 1 Hz eine Versagensdehnung von rund 3,6 mm/m sowie eine Bruchlastspielzahl von rund

1.300.000 Schwingungen ($\log N = 6,11$). Bei dieser Beanspruchungshöhe steigt die Dehnung um ca. 1,0 mm/m und die Schwingungszahl steigt um fast das 14,4-fache.

4.5.3 Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit

4.5.3.1 Beanspruchungshöhe

Theoretisch betrachtet wird die zum Versagen führende Dehnung mit sinkender Oberspannung größer, die Neigung der Hystereseschleifen nach den Erkenntnissen von *PARK* [79] u.a. geringer und somit der Steifigkeitsverlust bis zum Bruch wiederum größer. Durch eine Verringerung der Oberspannung σ_0 verringert sich die aufbringbare Restbruchenergie und danach muss ein größerer Energiebetrag bis zum Versagen abgebaut werden: Ermüdungswiderstand und Bruchlastspielzahl steigen.

In den eigenen Untersuchungen wurde die Auswirkung der Beanspruchungshöhe auf die Bruchlastspielzahl in einem Spannungsbereich von $\sim 0,60 \beta_c$ bis $\sim 0,84 \beta_c$ betrachtet. Es wurde der Frage nachgegangen, ob eine Proportionalität über den Spannungsbereich der untersuchten Betone besteht und wie sich die Beanspruchungshöhe ober- und unterhalb der kritischen Spannung σ_{krit} auf die Bruchlastspielzahl auswirkt.

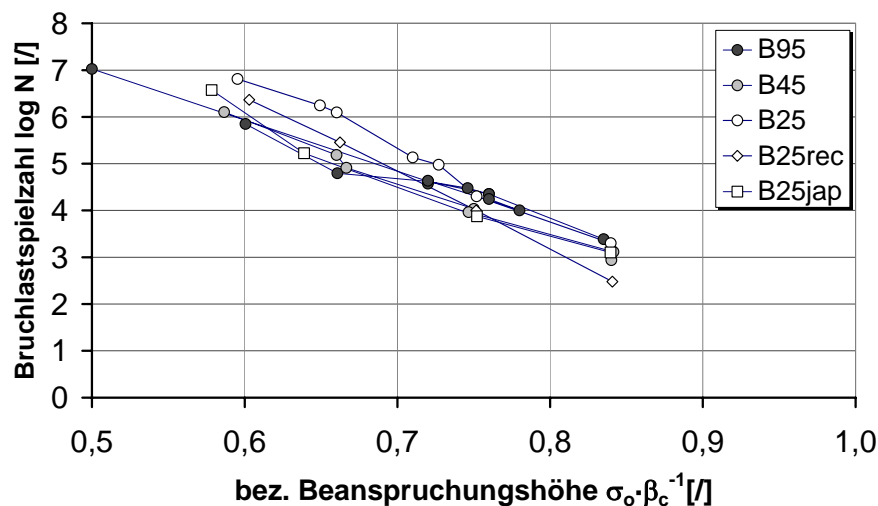


Abbildung 38: Bruchlastspielzahl in Abhängigkeit der Beanspruchungshöhe

In *ABBILDUNG 38* sind die mittleren Bruchlastspielzahlen $\log N$ über die Beanspruchungshöhe $\sigma_0 \cdot \beta_c^{-1}$ bei einer Beanspruchungsfrequenz von 10 Hz aufgetragen. Die Bruchlastspielzahl fällt mit steigender Beanspruchungshöhe exponentiell ab. Die Steigungen und der Verlauf der jeweiligen Ergebniswerte differieren dabei im Rahmen der Prüfstreuung.

4.5.3.2 Steifigkeit

Eine weitergehende Betrachtung der Bruchlastspielzahlverläufe der einzelnen Beanspruchungsniveaus über die jeweiligen Betonsteifigkeiten, dargestellt durch den Anfang-Verformungsmodul D_0 (*ABBILDUNG 39*), lässt eine Verlaufsänderung in Form eines Bruchlastspielzalsprungs im Bereich der kritischen Spannung erkennen. Die einzelnen Verläufe in den Bereichen unterhalb und oberhalb der kritischen Spannung sind jeweils gleichartig.

- Unterhalb der kritischen Spannung $< 0,75 \beta_c$ wird der Ermüdungswiderstand des Betons zusätzlich durch Langzeit-Mechanismen beeinflusst (*SIEHE KAPITEL 3.11.3 SEITE 17*). Die Bruchlastspielzahl ist in diesem Beanspruchungsbereich vorrangig von der Verformungsfähigkeit (der Bruchdehnung) des Betons und der Beanspruchungshöhe abhängig. Der Beton der Festigkeitsklasse B 25 mit geringer Steifigkeit hat eine höhere Ermüdungsfestigkeit als der Beton der Festigkeitsklasse B 95.
- Oberhalb des kritischen Spannungsbereiches $\geq 0,75 \beta_c$ ist der Ermüdungswiderstand eines Betons von der Beanspruchungshöhe und der Steifigkeit abhängig.

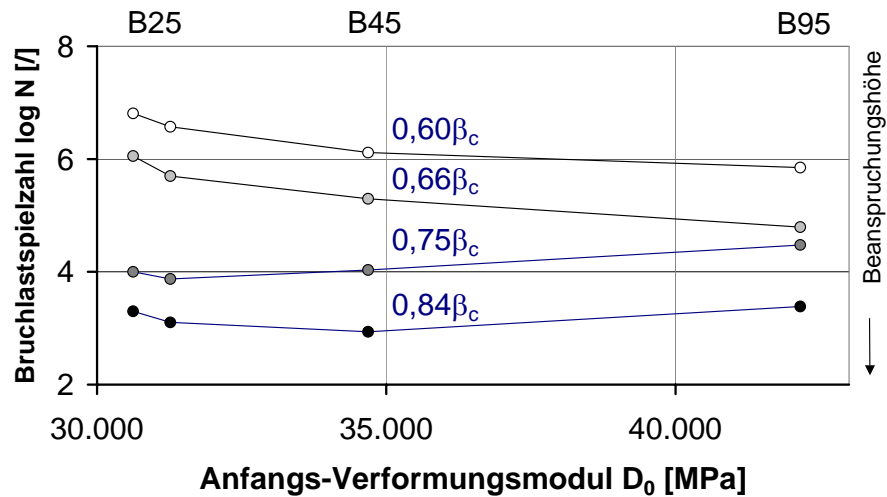


Abbildung 39: Bruchlastspielzahl in Abhängigkeit der Beanspruchungshöhe und Betonfestigkeitsklasse

4.5.3.3 Anfangs-Steifigkeit

Betrachtet man die Ausgangs-Steifigkeit des Betons vor der Druckschwellbeanspruchung, so ist zu beobachten, dass der Einfluss des Verformungsvermögens auf die Bruchlastspielzahl mit steigender Betonfestigkeitsklasse bzw. steigender Betonsteifigkeit abnimmt. *ABBILDUNG 40* stellt dar, inwieweit die ermittelten Bruchlastspielzahlen bei Abweichung der einzelnen Verformungsmoduln vom mittleren Anfangs-Verformungsmodul \bar{D} einer Serie schwanken.

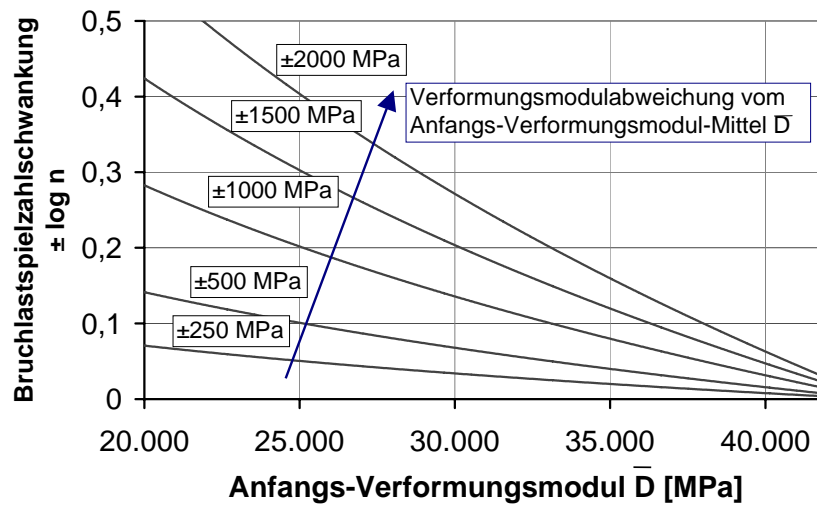


Abbildung 40: Steifigkeitseinfluss auf die Bruchlastspielzahl

Bei einem hochfesten spröden Beton der Festigkeitsklasse B 95 haben Anfangs-Verformungsmodulschwankungen nur geringen Einfluss auf die Bruchlastspielzahl. Eine Abweichung des Anfangs-Verformungsmoduls von ± 1.000 MPa vom Serienmittel verursachen eine Veränderung der mittleren Bruchlastspielzahl von rund $\log n = \pm 0,016$. Bei einem B 25 hingegen ist ein stärkerer Einfluss vorhanden. Eine D-Moduländerung von ± 1000 MPa ruft eine stärkere mittlere Bruchlastspielzahländerung von rund $\log n = \pm 0,25$ hervor. Die Anfangs-Verformungsmodul-Prüfungen wiesen je nach Betonfestigkeitsklasse durchschnittliche Standardabweichung von ca. 600 MPa bis 1.200 MPa auf. Diese Streubreiten der Verformungsmoduln liegen in einem tolerierbaren Bereich.

4.5.3.4 Ruhephasen

Die Auswirkung von Ruhephasen auf die Dauerschwingfestigkeit wurde 1923 von *CREPPS* [21] untersucht. Weitere Untersuchungen diesbezüglich von *HATT* [42], *HILSDORF UND KESLER* [44] und *HÄRIG* [41] folgten. Die Untersuchungen wurden vorwiegend als Biegewechsel- und Biegeschwellversuche durchgeführt. *HÄRIG* [41] befasste sich mit den Folgen von Ruhephasen bei Druckschwellversuchen. Es zeigte sich, dass durch Ruhephasen bis ca. fünf Minuten eine Erhöhung der relativen Dauerschwingfestigkeit zu verzeichnen ist. Ruhephasen über fünf Minuten haben keinen weiteren erkennbaren Einfluss.

Durch die Rissentwicklung (*KAPITEL 3.11, SEITE 17*) muss nach einer Ruhephase mehr Energie aufgewendet werden, um den vorherigen Verformungszustand wieder herzustellen. Die teilweise rückgebildeten Verformungen an der Risspitze müssen sich aufbauen und die vorhandenen Eigenspannungen im überdrückten Gebiet hinter der Risspitze überwunden werden.

Diese Erkenntnisse stimmen für einen Spannungsbereich $\sigma_o < \sigma_{krit}$ mit den eigenen Untersuchungen überein, sie ergaben, dass der Ruhephaseneinfluss über die fünf Minuten hinaus noch eine Änderung der Bruchlastspielzahl verursacht. Eine Stagnation des Ruhephaseneinflusses trat zwischen 5 und 30 Minuten ein. Der Einfluss wird vermutlich je nach Betonart und -festigkeit variieren.

Die maximal ertragbare Schwingungszahl betrug bei einer Beanspruchungshöhe von rund $0,66 \beta_c$ ohne Ruhephase ca. 165.000 Zyklen und mit einer Ruhephase mehr als 400.000 Zyklen. Die Bruchlastspielzahl stieg damit um mehr als das 2,4-fache durch die eingebaute Ruhephase an (*ABBILDUNG 41*).

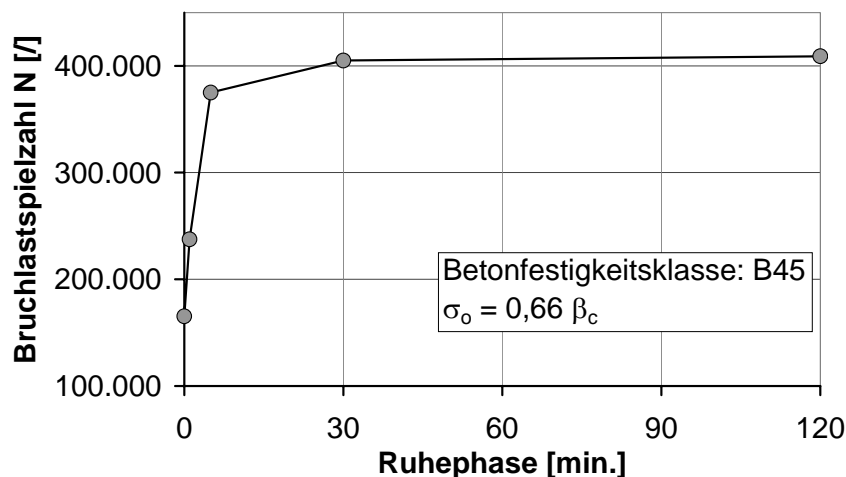


Abbildung 41: Einfluss der Ruhephase auf die ertragbare Schwingungszahl ($0,66 \beta_c$)

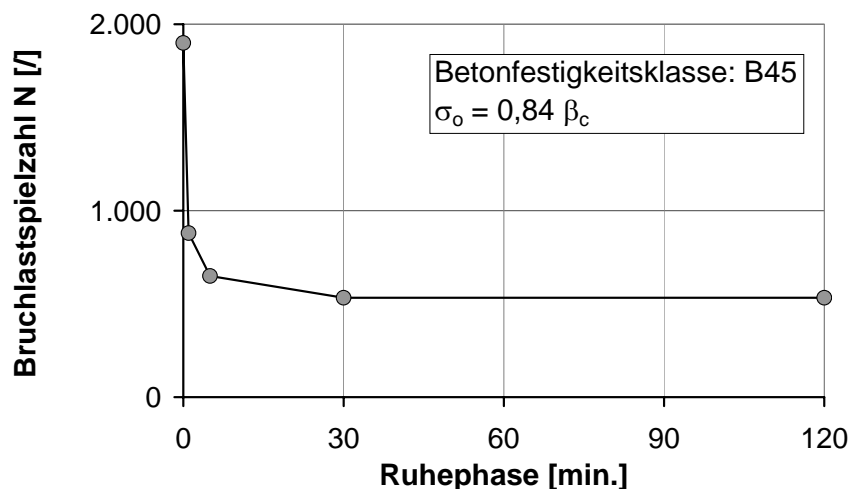


Abbildung 42: Einfluss der Ruhephase zwischen den Schwingungen auf die ertragbare Schwingungszahl ($0,84 \beta_c$)

Bei einer Beanspruchungshöhe von rund $0,84 \beta_c$ ist ein umgekehrter Einfluss der Ruhephase zu beobachten (ABBILDUNG 42). Die mittlere ertragbare Schwingungsanzahl N sinkt für Ruhephasen ≥ 30 min. auf rund $\frac{1}{4}$ der maximalen Schwingungsanzahl N ohne Ruhephase ab. Erklären lässt sich dies mit der Änderung der Rissbildung. Es entstehen Axialrisse an den Matrix-Kegelspitzen der Zuschlagkörner infolge der Überschreitung der aufnehmbaren Zugspannung in Querrichtung (SIEHE KAPITEL 3.11.3, SEITE 17). Die Streuung der Ergebniswerte (ABBILDUNG 41 und ABBILDUNG 42) sind im ANHANG A8 dargestellt.

Der bei Belastung geöffnete Riss wird bei Entlastung durch Reibung - Berührung der Rissufer - am Schließen gehindert. Bei der Entlastung kann es durch das unterschiedliche Verformungsverhalten von Zuschlagelement und Matrix zu einer Art Keilwirkung der Matrix-Kegelspitze kommen, was zu weiteren inneren Spannungen führt. Die Matrix baut im Gegensatz zu einem Zuschlagelement die aufgebrachte Verformung über einen längeren Zeitraum ab.

Die Rückverformung des Zuschlagelements wird durch die umgebende Matrix behindert. Diese durch die Behinderung und Verteilung entstehenden inneren Spannungszustände können einen Vortrieb Matrix-Kegelspitze in Richtung Axialriss verursachen, was einen Rissfortschritt zur Folge haben kann (ABBILDUNG 43). Dieser Rissfortschritt und damit der Einfluss der Entlastungszeit kommt zum Erliegen, wenn die inneren Spannungen durch plastische Verformung und Rückbildung der viskosen Verformung soweit abgebaut wurden, dass die lokale Zugfestigkeit der Matrix an der Axialrisspitze nicht mehr überschritten wird (ABBILDUNG 44).

Bei hoher Beanspruchung wird auch in der Ruhephase die Betonmatrix aufgrund innerer Spannungen nachhaltig weitergeschädigt. Demnach ist auch der zum Versagen führende Energieaufwand bei einer vorhandenen Ruhephase geringer, als wenn keine Ruhephase vorhanden wäre.

Bei niedriger Beanspruchung hingegen wird durch die Entlastungsphase der Ermüdungswiderstand infolge der Überdrückung der Mikrorisspitzen erhöht. Es wird mehr Energie für den Schädigungsprozess benötigt.

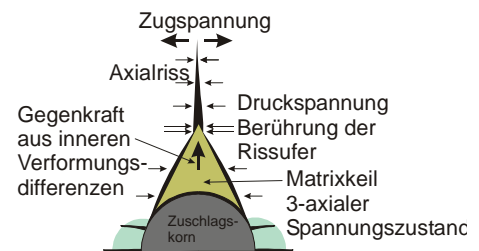


Abbildung 43: Axialrissentwicklung bei Entlastung

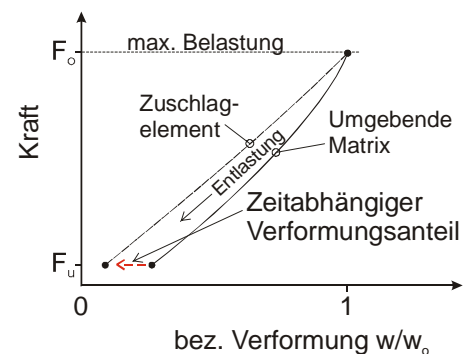


Abbildung 44: Verlauf der Kraft-Verformungslinie bei Entlastung von Zuschlagelement und Matrix

4.5.3.5 Frequenz

Um den Frequenzeinfluss zu untersuchen wurden eigene Ermüdungsversuche mit Frequenzen von 0,1 Hz bis 20 Hz an luftgelagerten und wassergelagerten Betonen der Klassen B 25, B 45 und B 95 durchgeführt. Die Unterspannung war konstant $\sim 2,0$ MPa. Die Spannungsamplitude wurde durch die Oberspannung variiert.

Die eigenen Untersuchungen bestätigten grundsätzlich die Ergebnisse von Reinhardt et al [84]. Die Regressionsgeraden der Messwerte bei 1 Hz und 10 Hz Beanspruchungsfrequenz weisen einen differenten Steigungsverlauf über den dargestellten Spannungsbereich auf und haben einen Schnittpunkt im Bereich der kritischen Spannung bei rund $0,75 \beta_c$.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen von REINHARDT ET AL [84] erträgt der untersuchte Beton im Spannungsbereich unterhalb der kritischen Spannung mit sinkender Oberspannung und kleiner Beanspruchungsfrequenz (1 Hz) mehr Beanspruchungszyklen als bei hohen Frequenzen (10 Hz). Erst bei sehr hoher Beanspruchung, im Bereich der Kurzzeitfestigkeit, kehrt sich der Einfluss um. Bei Frequenzen ab 10 Hz ist der Einfluss nur noch gering, die Bruchlastspielzahl hängt dann nur noch von der Beanspruchungshöhe ab (SIEHE KAPITEL 4.5.2.2, SEITE 35).

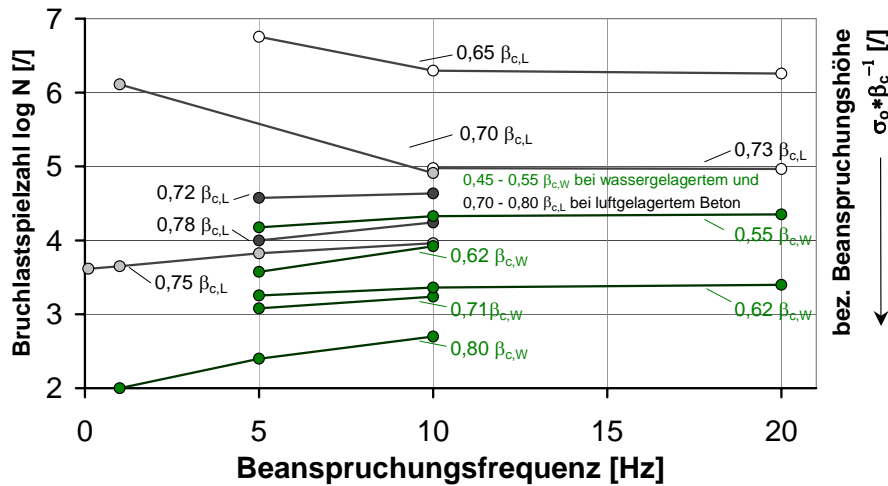


Abbildung 45: Einfluss der Frequenz auf die Lebensdauer in Abhängigkeit der Beanspruchungshöhe und des Betonfeuchtigkeitsgehaltes

Bei langsamer Beanspruchung kann die Entlastung zum Teil als eine Art Ruhephase angesehen werden, welche je nach Beanspruchungshöhe entweder ermüdungswiderstandsfördernd oder -mindernd wirken kann.

Die Darstellung von Bruchlastspielzahl über die Beanspruchungsfrequenz (ABBILDUNG 45), welche die Ergebniswerte von luft- und wassergelagerten Betonen der Festigkeitsklasse B 25, B 45 und B 95 beinhaltet, lässt einen von der Betonfestigkeitsklasse unabhängigen, aber von Bruchlastspielzahl abhängigen Verlauf erkennen. In dem Bruchlastspielzahlbereich über 10^4 bis 10^5 Schwingungszyklen wirken sich geringe Frequenzen (< 10 Hz) ermüdungswiderstandserhöhend und darunter -verringemd aus. Diese Umkehr des Frequenzeinflusses, welcher als Kurzzeitfestigkeitsgrenze angesehen werden kann, liegt bei luftgelagertem Beton bei ca. $0,75 \beta_c$ und bei wassergelagertem Beton rund $0,45 \beta_c$ bis $0,55 \beta_c$.

4.5.3.6 Feuchtigkeitsgehalt im Beton

In der Vergangenheit befassten sich REINHARDT [85], ROSSI ET AL [93][94], GALLOWAY, HARDING UND RAITHBY [33], KLUG UND WITTMANN [38] sowie ROSS [92] u.a. mit den Auswirkungen des Feuchtigkeitsgehaltes im Beton. Die eigenen Untersuchungen bestätigten, dass wassergelagerte Betone geringere Ermüdungsfestigkeiten als luftgelagerte aufweisen (ABBILDUNG 46).

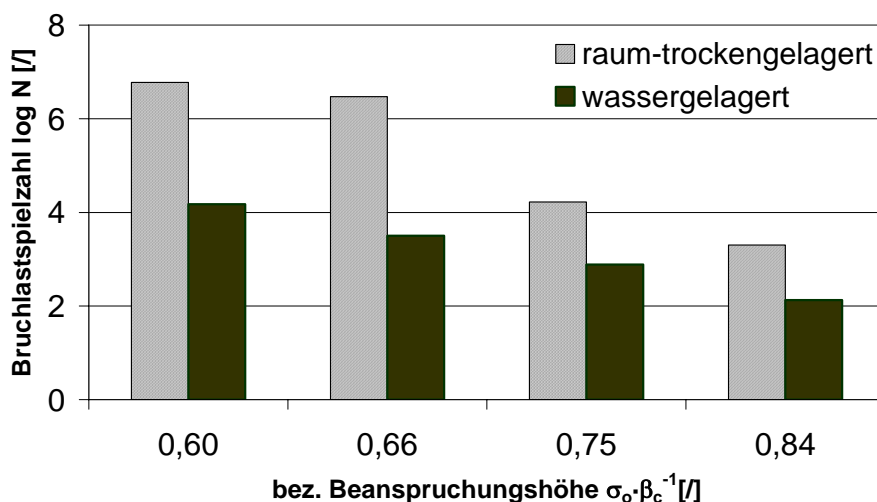


Abbildung 46: Vergleich der Bruchlastspielzahl von wasser- und luftgelagertem Beton der Festigkeitsklasse B25

Entsprechend der Lagerungsart, der Betonart und der Einlagerungsmöglichkeiten des freien Wassers konnten erhebliche Unterschiede des Ermüdungswiderstands ermittelt werden. Je nach

Feuchtigkeitsgehalt ändert sich die Bruchlastspielzahl. Die Bruchlastspielzahlen der wassergelagerten Betone der Festigkeitsklasse B25 und B45 waren bis zu 10^3 -fach geringer als die der vergleichbaren luftgelagerten Betone.

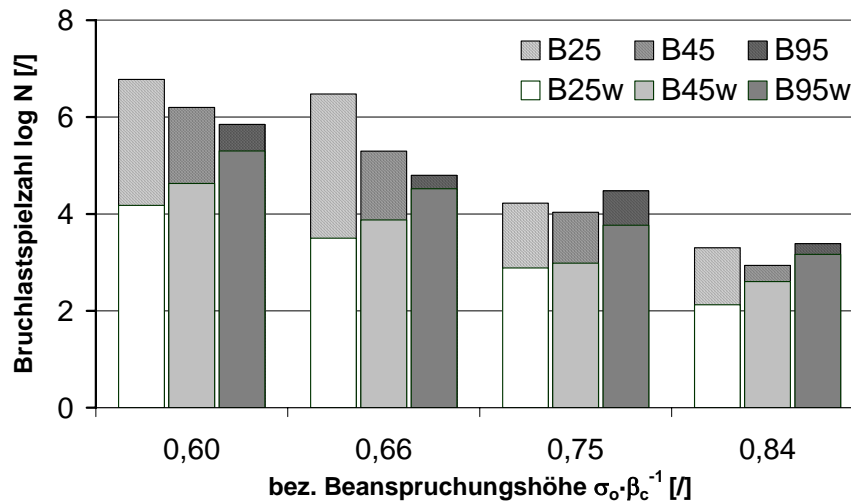


Abbildung 47: Vergleich der Bruchlastspielzahlen von wasser- und luftgelagertem Beton

In der vorliegenden Versuchsreihe kehrte sich dadurch die Reihenfolge des Ermüdungswiderstands der untersuchten Betone um (ABBILDUNG 47). Der Beton der Festigkeitsklasse B25 hat bei Luftlagerung die höchste und bei Wasserlagerung die geringste Bruchlastspielzahl.

Der normalfeste Beton B25 zeigt, aufgrund seiner höheren Porosität und damit einem hohen Wassereinlagerungsvermögen, gegenüber den höherwertigen Betonen, den stärksten Einfluss bei Änderung des inneren Feuchtigkeitsgehaltes auf. Hochfester Beton wies aufgrund seines sehr dichten Gefüges die geringsten Bruchlastspielzahldifferenzen auf.

Betone, welche über 180 Tage luftgelagert und anschließend mehr als 60 Tage (bis zur Massekonstanz) wassergelagert wurden, ergaben nahezu gleiche Bruchlastspielzahl-Ergebnisse, wie die ab dem Ausschalen wassergelagerten Betone.

Dies begründet die Tatsache, dass die Zeitfestigkeit von dickeren Betonbauteilen im Gegensatz zu dünneren unter sonst gleichen Bedingungen, infolge der langsameren Austrocknung und demnach höheren Feuchtigkeitsgehalt geringer ist.

Eine Erklärung hierfür ist die Erhöhung der resultierenden lokalen Zugspannungen im Gefüge durch die nahezu inkompressiblen wassergefüllten Poren des Betons, welche einen größeren Spannungswiderstand und eine höhere Querdehnung verursachen.

4.5.3.7 Einflüsse auf die Bruchlastspielzahl - Erkenntnis

Das hervorzuhebende Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass sich der Einfluss der Parameter (Ruhephasen in der Beanspruchung, Frequenz) ab einer Beanspruchungshöhe bei luftgelagertem Beton bei ca. $0,75 \beta_c$ und bei wassergelagerten Beton bei ca. $0,55 \beta_c$ umkehrt. Der Umkehrpunkt liegt bei einer Bruchlastspielzahl von rund 10^4 Zyklen und im Bereich der jeweiligen kritischen Spannung, welche sich durch den Wendepunkt der im statischen Bruchversuch ermittelten Volumenänderungskurve ergibt (ABBILDUNG 48).

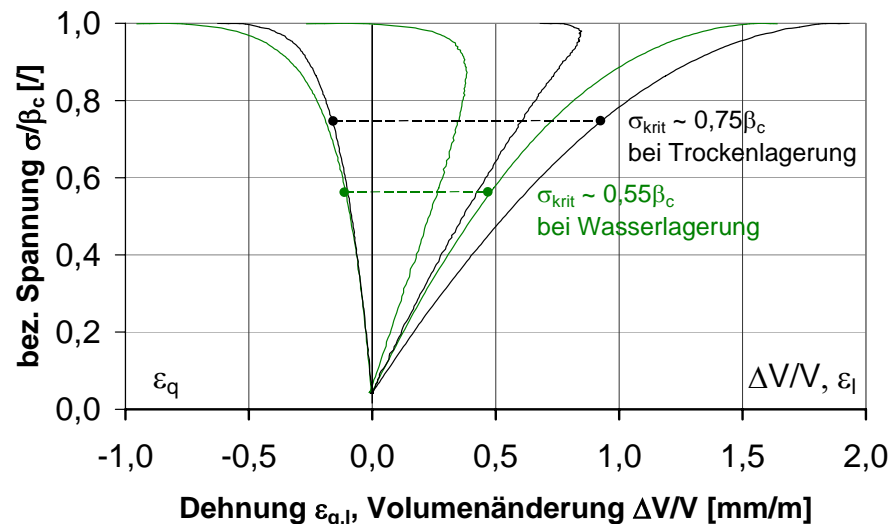


Abbildung 48: Kritische Spannung bei luft- und wassergelagertem Beton

In der Tabelle 13 sind die Erkenntnisse über die Einflüsse auf die Bruchlastspielzahl zusammengefasst:

Tabelle 13: Einflüsse auf die Bruchlastspielzahl

	Einfluss auf die Bruchlastspielzahl		Abb.
Beanspruchungshöhe	N fällt mit steigender Beanspruchung exponentiell ab		38
Steifigkeit	$\sigma_o < \sigma_{krit}$ ($\sigma_o = 0,60 \beta_c / 0,66 \beta_c$):	Beeinflussung durch Langzeitmechanismen (Sprung!)	39
	$\sigma_o > \sigma_{krit}$ ($\sigma_o = 0,75 \beta_c / 0,84 \beta_c$):	Beanspruchungshöhe und Steifigkeit: N steigt mit Anfangsverformungsmodul, N sinkt Beanspruchungshöhe	
Anfangssteifigkeit (Streuung)	Einfluss des Verformungsvermögens (die Streuung beim Anfangsverformungsmodul) nimmt mit steigender Steifigkeit (Festigkeitsklasse) ab		40
Ruhephasen	$\sigma_o < \sigma_{krit}$ ($\sigma_o = 0,66 \beta_c$):	N stieg bei Ruhephasen bis 30 min an	41,42
	$\sigma_o > \sigma_{krit}$ ($\sigma_o = 0,84 \beta_c$):	N sinkt bis ca. 30 min	
Frequenz	Frequenz $\leq 0,1$ Hz	kein Frequenzeinfluss	45
	Für Frequenzen 1 Hz bis 10 Hz	$< \sigma_{krit}$ kleine Frequenzen höheres N $> \sigma_{krit}$ kleine Frequenzen niedrigeres N	
	Frequenz ≥ 10 Hz	kein Frequenzeinfluss	
Feuchtigkeitsgehalt	Wassergelagerter Beton	höhere Festigkeitsklassen höhere N kleineres N als „luftgelagerte“ gleicher Festigkeitsklasse	46,47
	Luftgelagerter Beton	höhere Festigkeitsklassen niedrigere N ($\sigma_o < \sigma_{krit}$) größeres N als „wassergelagerte“ gleicher Festigkeitsklasse	

4.5.4 Versagenskriterien

Bei einem Werkstoffversagen durch Ermüdungsvorgänge gibt es mehrere Möglichkeiten den Versagenspunkt zu charakterisieren. Der Bruch kann mit Hilfe der Kraft-Verformungslinie, der maximalen Werkstoffdehnung, der Bruchfestigkeit oder auch durch die Reststeifigkeit gekennzeichnet werden. Bei der Versagensbetrachtung der kraftgeregelten Ermüdungsversuche ist die Betrachtung der Bruchdehnung und der Reststeifigkeit am ausdrückstärksten. Vorhandene Methoden und Ermüdungsmodelle berücksichtigten in der Regel nicht die Werkstoffeigenschaften, sondern nur die äußeren Einwirkungen.

Die eigenen Untersuchungen zeigen, dass bei Betrachtung des Betonermüdungswiderstands die stofflichen Eigenschaften wie die Bruchdehnung, der Elastizitätsmodul und der Feuchtigkeitsgehalt eine wesentliche Rolle spielen.

4.5.4.1 Beanspruchungshöhe

Grundsätzlich entsteht bei einem statischen Bruchversuch mit gleichzeitiger Verformungsmessung das Wertepaar: Kraft und Verformung. Dabei können einer Kraft, mit Ausnahme der maximalen Kraft, zwei Verformungswerte zugeordnet werden (ABBILDUNG 49). Einer im aufsteigenden Pre-Peak-Bereich P_{pre} und einer im Post-Peak-Bereich P_{post} . Die stabile Verformbarkeit bei einem bestimmten Kraftniveau wird durch die Kraft-Verformungskurve im Post-Peak-Bereich begrenzt. Nach Erreichen des Punktes P_{post} haben höhere Verformungen auf diesem Kraftniveau ein instabiles Verhalten zur Folge. Das Kraftniveau kann nicht mehr erreicht werden. Die Kraft fällt mit steigender Verformung entlang der Kraft-Verformungskurve ($P_{instabil}$) ab, der Beton versagt.

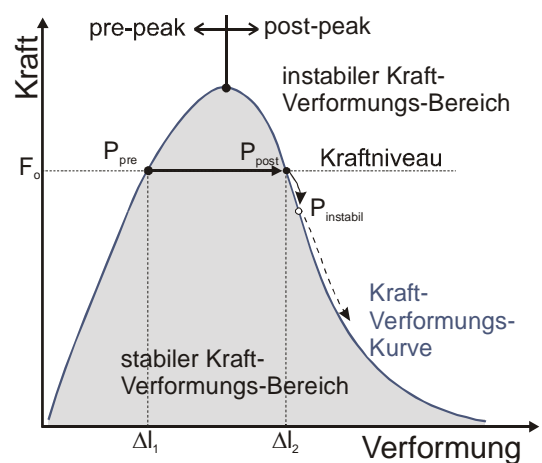


Abbildung 49: Versagensbetrachtung an der Kraft-Verformungskurve

Wird der Beton zyklisch be- und entlastet, so dass der Bruchversuch in mehreren Hystereseschleifen vollzogen wird, so ist zu beobachten, dass die Steigung der Hystereseschleifen mit zunehmender Dehnung abnimmt und dass sich die Sekante von Minimum und Maximum der Hystereseschleifen in einem gemeinsamen Punkt schneiden. Diese Modellüberlegung für Drucker-müdungsversuche von PARK [79] u.a. basiert auf der Kraft-Verformungskurve bei Stauchungsentfestigung (ABBILDUNG 50).

Keines dieser Modelle aber kam zur praktischen Anwendung, da sie sehr abhängig von den Randbedingungen der Versuchsdurchführung sind. Ein Problem für dieses Bruchkriterium stellt die Viskoelastizität von Beton dar. Soll die Kraft-Verformungskurve eines statischen Bruchversuches als Bruchkriterium auf Dauer- und Ermüdungbelastungen angewandt werden, dürfen die bei Langzeitbelastung auftretenden globalen Verformungen nur eine vernachlässigbare Rolle spielen. Der Verlauf einer Kraft-Verformungskurve von Beton ist aber abhängig von der Beanspruchungsgeschwindigkeit. Eine Kraft-Verformungskurve eines statischen Bruchversuches mit geringer Belastungsgeschwindigkeit weicht erheblich von der mit hoher Belastungsgeschwindigkeit ab. Wird bei der Betonbeanspruchung die Belastungsgeschwindigkeit geändert, so kommt es zu einer Verschiebung des Schnittpunktes.

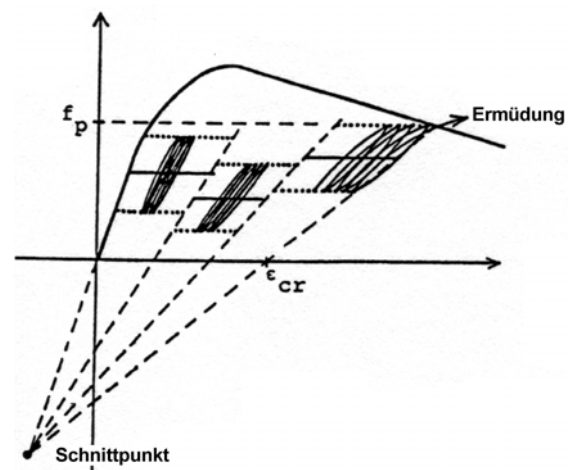


Abbildung 50: Schnittpunkt der statischen Kraft-Verformungskurve und der dynamischen Beanspruchungshöhe als Bruchkriterium für Ermüdungsversuche [79]

Ein direkter Vergleich zwischen dynamischer und statischer Kraft-Verformungs-Kurve und dem Schnittpunkt der Hystereseschleifen erscheint daher fraglich und ergab bei der Variation der Randbedingungen (Frequenz, Oberspannung, Betonart) keinen allgemein anwendbaren Ansatz.

Zudem unterliegt die Ermittlung des Post-Peak-Bereiches der Kraft-Verformungs-Kurve großen Streuungen, da die Zunahme der Betondehnung, nach dem Erreichen der maximalen Bruchfestigkeit in der Phase III, vorrangig durch die willkürliche Entstehung, Entwicklung und Öffnung von Rissen hervorgerufen wird und somit unkontrolliert überproportional anwächst.

Bei gleichen Versuchsbedingungen und gleicher Betonart konnte bei den eigenen Versuchen ein Schnittpunkt der Hystereseschleifen nachgewiesen werden (vergleichbar *ABBILDUNG 50, SEITE 44*). Die Lage des Schnittpunktes hängt von der Betonart, deren mechanischen Eigenschaften, der Beanspruchungsfrequenz und der gewählten Oberspannung – bzw. der Beanspruchungsgeschwindigkeit ab. Für eine allgemeingültige Lebensdauerabschätzung ist auch diese Modellbetrachtung wenig geeignet.

Betrachtet man diesbezüglich den Schnittpunkt der Sekanten des ermittelten Verformungsmoduls, so ist festzustellen, dass aufgrund der einsetzenden Krümmungsumkehr kein fester Schnittpunkt existiert. Die Sekanten der Verformungsmoduln des geschädigten Betons schneiden sich mit der des Anfangs-Verformungsmoduls. Die Schnittpunkte verlaufen auf einer Linie in Richtung des Ursprungs (*ABBILDUNG 51*).

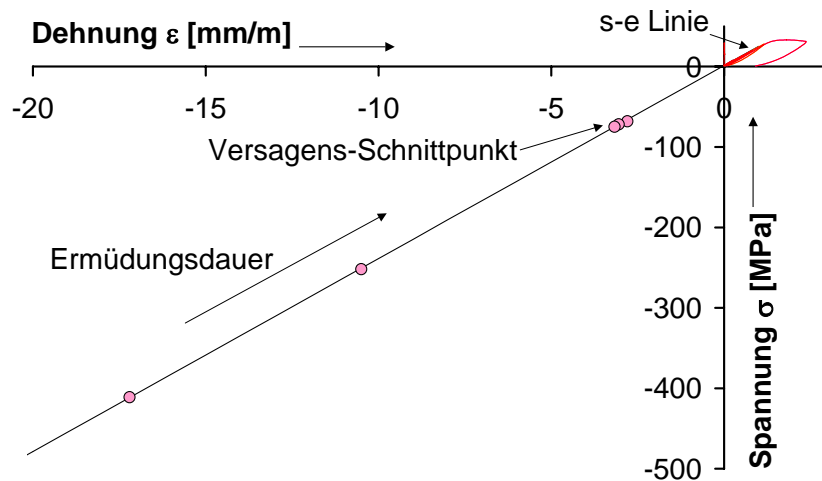


Abbildung 51: Schnittpunktverlauf der Verformungsmoduln

4.5.4.2 Energiebetrachtung

Beim Vergleich der benötigten Bruchenergie eines statischen Bruchversuchs mit einem Dauerstandversuch ist zu beobachten, dass bis zum Bruch beim langzeitbeanspruchten Beton für den Verformungsfortschritt und somit für die Rissentstehung und –entwicklung, aufgrund seines viskoelastischen Verhaltens ein geringerer Energieaufwand benötigt wird. Damit erscheint es möglich, die Auswirkungen der Verformungen unter Langzeitbelastung und die dadurch erzeugten Schädigungen an Hand dieses Energieunterschiedes ansatzweise abschätzen zu können. Die Bruchenergie kann zum einen aus den Flächeninhalten der Umhüllenden der Hystereseschleifen ermittelt werden oder zum anderen näherungsweise aus dem Beton zugehörigen Kraft-Verformungs-Diagramm eines statischen Bruchversuchs.

In *ABBILDUNG 52* ist eine repräsentative statische Kraft-Verformungs-Kurve, ein Hystereseschleifenverlauf bei dynamischer Beanspruchung sowie die abgebaute Bruchenergie und die Restbruchenergie nach n Lastwechseln dargestellt.

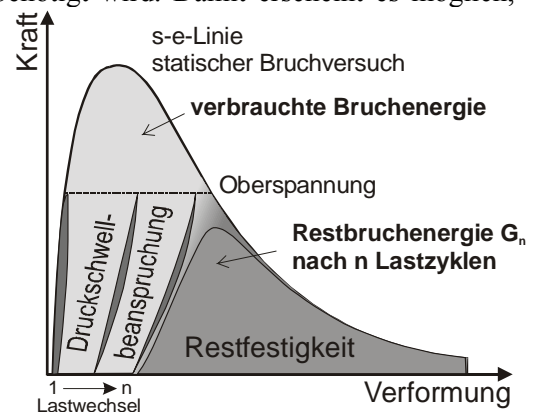


Abbildung 52: Kraft-Verformungskurve

Wird nach n Beanspruchungszyklen die statische Restbruchfestigkeit eines dynamisch beanspruchten Betonprobekörpers ermittelt, so entspricht der Flächeninhalt einer aufgezeichneten Kraft-Verformungslinie näherungsweise der bis zum Bruch noch aufzubringenden Bruchenergie G_n . Geht man von der Annahme aus, dass die gesamte Fläche unter der statischen Last-Verformungs-Kurve die gesamte zum Versagen benötigte Bruchenergie darstellt, kann gefolgert werden, dass die durch die Ermüdungsbeanspruchung abgebaute Energie der Restfläche G_n entspricht. Somit lässt sich näherungsweise mit Hilfe einer Energiebetrachtung des Hystereseschleifenverlaufes jederzeit die während eines Versuches verbrauchte Energie bestimmen und die Lebenszeit abschätzen.

Praktisch betrachtet ist diese Vorgehensweise, über eine Energiebetrachtung ein Bruchkriterium für die Ermüdung zu schaffen, ein ungenaues Verfahren. Die kombinierte Betrachtung von dynamisch-statischen Kraft-Verformungsverläufen ist fraglich, da die Differenzen zwischen statischen und dynamischen Kraft-Verformungsverläufen aufgrund von vielen Einflüssen, wie Materialinhomogenität, Viskosität, Beanspruchungsparameter usw. nicht gleichbleibend ist und bei einer Druckschwellbetrachtung auch nicht ohne weiteres vernachlässigt werden kann.

4.5.4.3 Steifigkeitsverlust

Bei Dauerstands- und Ermüdungsbeanspruchungen nimmt die Steifigkeit des Betons entsprechend den Beanspruchungen und Werkstoffeigenschaften ab.

Es erscheint möglich, basierend auf den vorangegangenen Überlegungen und der daraus resultierenden Steifigkeitsminderung, den durch die Ermüdung hervorgerufenen Versagenspunkt zu beschreiben.

Theoretisch können durch die Steigungen jedem Kraftniveau zwei Elastizitätsmoduln zugeordnet werden, welche den stabilen Kraft-Verformungs-Bereich der Kraft-Verformungskurve begrenzen. Wird der E-Modul im Post-Peak-Bereich unterschritten, bewirkt dies ein instabiles Verhalten. Die belastende Kraft kann nicht mehr gehalten werden. Erreichen die durch die dynamische Beanspruchung erzeugten Hystereseschleifen den Post-Peak-Bereich und unterschreitet der Beton somit einen für die Beanspruchung und Betonfestigkeitsklasse charakteristischen E-Modulwert, versagt das Material.

Je nach Beanspruchung und Betonart/-festigkeitsklasse ergibt sich eine zum Bruch führende minimale charakteristische Steigung der Hystereseschleifen, welche durch den Versagens-Elastizitätsmodul beschrieben werden kann.

4.5.5 Abschätzung der Bruchlastspielzahl

Die meisten nationalen Codes haben die Betonermüdung relativ oberflächlich behandelt. Bei Druckbeanspruchung wurde nur eine Beschränkung der maximal zulässigen Beanspruchung mit 0,50 der Zylinderdruckfestigkeit [1] bzw. Würfeldruckfestigkeit [73] vorgeschlagen. Idee dieser Methode war es, die maximal zulässigen Spannungen unter einem Niveau zu halten, wo dynamische Spannungsänderungen keine Schäden an der Struktur bewirken würden. Der Einsatz von Beton beim Bau von Ölplattformen in der Nordsee machte konkretere Regeln für eine Bewertung der Betonermüdung notwendig. Die meisten Ermüdungsformulierungen sind von halblogarithmischer Form $\log N = f(\sigma_{\max}, \sigma_{\min})$.

In diesem Abschnitt soll die Anwendbarkeit und Aussagegenauigkeit von ausgewählten Schadenshypothesen diskutiert und mit eigenen Ergebniswerten der Druckschwellversuche verglichen werden.

Wie im *KAPITEL 3.8, SEITE 10* beschrieben, ist es bislang nicht möglich, die Bruchlastspielzahl bei der Ermüdung von Beton vorherzubestimmen. Die existierenden Modelle sind nicht allgemein gültig anwendbar. Eine genaue Abschätzung ist aufgrund hoher Abweichungen durch Vernachlässigung beeinflussender Parameter kaum möglich. Die Lebensdauer wird vorwiegend modellhaft über die einwirkenden Spannungen ermittelt. Es fehlen weitere Parameter, die den Zustand des Betons berücksichtigen, wie Porosität oder Gehalt an freiem Wasser.

Betrachtet werden soll beispielhaft das im *MODEL-CODE* [15] enthaltene empirisch ermittelte Verfahren zur Abschätzung der Betonfestigkeit bei zyklisch-mechanischer Druckbeanspruchung (*SIEHE KAPITEL 3.9.1, SEITE 11*) und die Bruchlastspielzahlabschätzung nach den Veritas Regeln bzw. dem Norwegian Code, welches die Umgebungsbedingungen (in Luft oder in Wasser) berücksichtigt [104].

4.5.5.1 Nach Model-Code

Laut *MODEL-CODE* [15] besteht die Möglichkeit, die Bruchlastspielzahl N für druck-, zug-, wechselbeanspruchten Beton über die einwirkende Ober- und Unterspannung für den Beanspruchungsbereich von $0 \leq S_{c,min} \leq 0,8$ abzuschätzen:

$$S_{c,min} = |\sigma_{c,min}| / f_{ck,fat} \quad \text{mit } S_{c,max}, S_{c,min} \dots \text{maximale bzw. minimale Druckspannungsverhältnis,}$$

$$S_{c,max} = |\sigma_{c,max}| / f_{ck,fat} \quad \sigma_{c,max}, \sigma_{c,min} \dots \text{charakteristische Ober- bzw. Unterspannung,}$$

$$f_{ck,fat} \dots \text{charakteristische Referenz-Druckfestigkeit der Ermüdungsbeanspruchung.}$$

Die Bruchlastspielzahl lässt sich für Druckschwellbeanspruchungen wie folgt ermitteln (weitere Beanspruchungsarten bleiben hierbei unberücksichtigt):

$$\log N_1 = (12 + 16S_{c,min} + 8S_{c,min}^2)(1 - S_{c,max}) \quad (4.1)$$

$$\log N_2 = 0,2 \log N_1 (\log N_1 - 1) \quad (4.2)$$

$$\log N_3 = \frac{\log N_2 (0,3 - 0,375 S_{c,min})}{|S_{c,min}| - |S_{c,max}|} \quad (4.3)$$

- $\log N_1 \leq 6$: $\rightarrow \log N = \log N_1$
- $\log N_1 > 6$: $|S_{c,max}| - |S_{c,min}| \geq 0,3 - 0,375 S_{c,min}$ $\rightarrow \log N = \log N_2$
 $|S_{c,max}| - |S_{c,min}| < 0,3 - 0,375 S_{c,min}$ $\rightarrow \log N = \log N_3$

Der Verlauf der S-N Beziehung ist unter Berücksichtigung von Ober- und Unterspannung prinzipiell in *ABBILDUNG 53* dargestellt.

Ein Vergleich der S-N-Beziehung nach Model Code mit den Ergebnissen der eigenen Untersuchung zeigt, dass bei Luftlagerung eine zu konservative und bei Wasserlagerung eine zu positive Bewertung der Bruchlastspielzahl nach Model Code erreicht wird (*ABBILDUNG 54*).

Dieses Ergebnis zeigt die Notwendigkeit, weitere Parameter in die Ermüdungsbeziehung einfließen zu lassen. Es ist nicht ausreichend, nur die Spannungshöhen zu betrachten und darüber die Ermüdungsfestigkeit abzuschätzen. Für die Lebensdauerabschätzung des heterogenen zeitabhängigen Mehrstoffsystems Beton sind weitere Komponenten zu berücksichtigen und zu kombinieren.

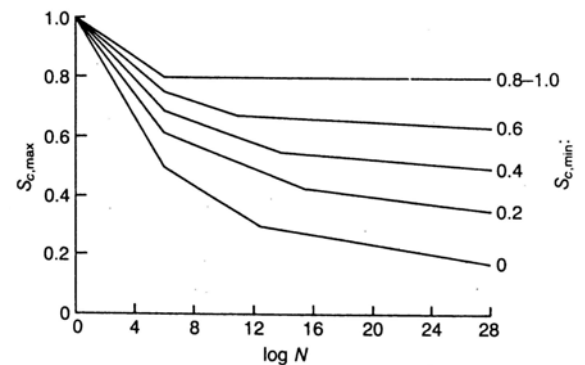


Abbildung 53: S-N-Beziehung nach Model Code [15]

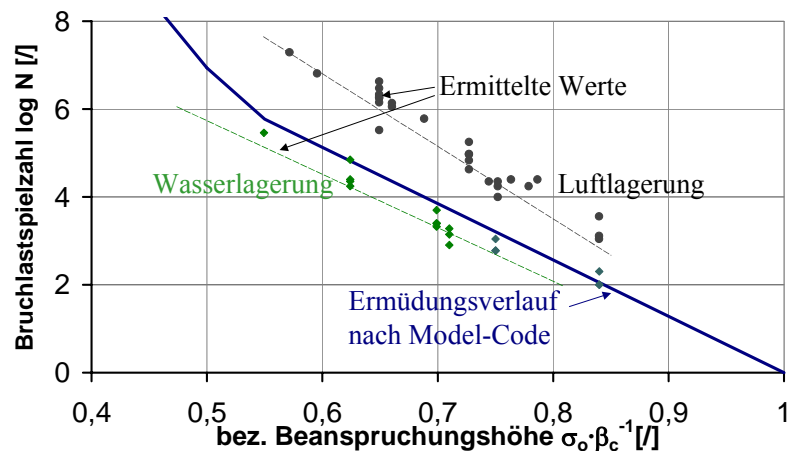


Abbildung 54: Vergleich der eigenen Ergebnisse mit dem Ermüdungsverlauf nach Model-Code [15]

4.5.5.2 Nach Veritas Regel (Norwegian Code)

Die *VERITAS REGELN* [104] (*ABBILDUNG 55*) und die Grundformel im *NORWEGIAN CODE* [74] haben für die Abschätzung der Bruchlastspielzahl bei Druckschwellbeanspruchung die folgende Form:

$$\log N = k \cdot (1 - S_{\max}) \cdot (1 - S_{\min})^{-1} \quad (4.4)$$

Der Ausdruck k ist ein konstanter Korrekturfaktor, der die Steigung der Ermüdungslinie wiedergibt (*ABBILDUNG 56*). Er ist für Konstruktionen in der Luft gleich 12 und für Konstruktionen im Wasser (Seewasser) gleich 10.

$$S_{\max} = \sigma_{\max} / \beta_c \quad \text{und} \quad S_{\min} = \sigma_{\min} / \beta_c.$$

Eine andere viel diskutierte Form [89] der Gleichung (4.4) hat $(1-R)$ im Nenner, mit $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$. Die Gleichungen, sind im Fall von $\sigma_{\min} = 0$ identisch. Für alle anderen Spannungszustände ergibt die Formel mit $(1-R)$ ein längeres Lebensdauerergebnis.

Die Ergebniswerte für den Faktor k (12 für Luftlagerung und 10 für Wasserlagerung) konnten durch die eigenen Erkenntnisse (*TABELLE 14* UND *TABELLE 15*) nur teilweise bestätigt werden. Der Faktor k lag für die wassergelagerten Betone (B 25, B 45, B 95) zwischen $k = 9,2$ und $k = 19,0$ und für die luftgelagerten Betone (B 25, B 45, B 95) zwischen $k = 13,8$ und $k = 21,8$.

Wird nur die Festigkeitsklasse B 25 und B 45 betrachtet, so liegt der Korrekturfaktor bei wassergelagerten Betone im Mittel bei $k = 10,7$ und schwankt zwischen $k = 9,2$ und $k = 13,0$. Dieses Ergebnis liegt im erwarteten Bereich. Beim luftgelagerten Beton liegt der Faktor über dem vorgegebenen Wert $k = 12$ im Mittel bei $k = 16,2$ und schwankt zwischen $k = 13,9$ und $k = 21,8$.

Tabelle 15 : Faktor k für wassergelagerte Betone

Festigkeitsklasse	Frequenz [Hz]	σ_o / β_c	k-Faktor
B 25	5	0,62	10,5
		0,70	10,2
	10	0,62	10,8
		0,70	10,6
	20	0,71	10,6
		0,55	11,4
B 45	1	0,80	9,6
		0,63	9,3
	5	0,71	10,4
		0,80	11,5
	10	0,55	10,4
		0,63	10,2
B 95	10	0,71	10,9
		0,80	13,0
		0,66	13,0
		0,69	13,5
		0,75	14,6
		0,78	15,3
B 25	5	0,62	10,5
		0,70	10,2
	10	0,62	10,8
		0,70	10,6
	20	0,71	10,6
		0,55	11,4
B 45	1	0,80	9,6
		0,63	9,3
	5	0,71	10,4
		0,80	11,5
	10	0,55	10,4
		0,63	10,2
B 95	10	0,71	10,9
		0,80	13,0
		0,66	13,0
		0,69	13,5
		0,75	14,6
		0,78	15,3

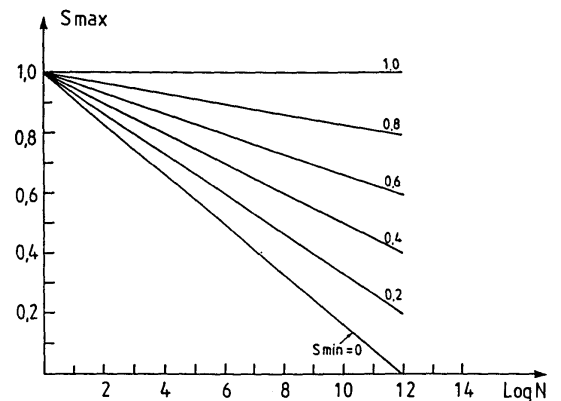


Abbildung 55: S-N Kurve nach Veritas Regeln für $C = 12$ [104]

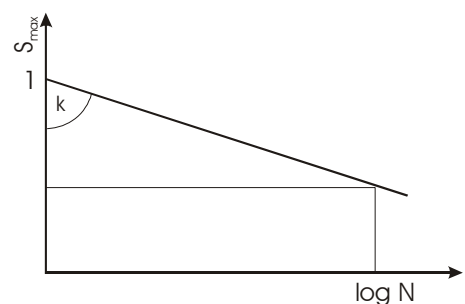


Abbildung 56: schematischer Ermüdungsverlauf

Tabelle 14: Faktor k für luftgelagerte Betone

Festigkeitsklasse	Frequenz	σ_o / β_c	k-Faktor
B 25	5	0,65	18,1
		0,60	15,9
	10	0,65	16,8
		0,66	16,9
		0,71	16,7
		0,73	17,2
		0,75	16,3
		0,84	19,4
	20	0,65	16,8
		0,69	17,5
		0,73	16,7
		0,75	16,3
B 45	0,1	0,75	13,8
		0,60	15,4
	1	0,66	16,7
		0,75	15,7
		0,84	13,9
	5	0,75	14,6
		0,59	14,3
	10	0,66	14,7
		0,67	14,2
		0,75	15,5
		0,84	18,9
	B 95	5	0,72
0,78			17,9
10		0,60	14,4
		0,66	13,9
		0,72	16,2
		0,75	17,3
B 25	5	0,65	18,1
		0,60	15,9
	10	0,65	16,8
		0,66	16,9
B 45	1	0,66	13,0
		0,69	13,5
	5	0,75	14,6
		0,78	17,8
B 95	10	0,76	17,8
		0,84	20,1
	5	0,72	16,0
		0,78	17,9

Der Korrekturfaktor des hochfesten Betons B 95 nimmt, unabhängig von der Lagerung, mit steigender Beanspruchungshöhe zu. Er liegt bei Luftlagerung zwischen $k = 13,8$ und $k = 20,1$ sowie bei Wasserlagerung zwischen $k = 13,0$ und $k = 19,0$. Für hochfeste Betone ist diese Form der Bruchlastspielzahlformulierung nicht anwendbar.

4.5.5.3 Abschätzung durch Ermüdungsversuche

Wie aus der Literatur bekannt, ist es möglich, durch Betrachtung der Kriech- bzw. Verformungsgeschwindigkeit der maximalen bzw. minimalen Dehnung in der Phase II der Ermüdungsschädigung (*secondary creep*), die Lebensdauer in Versuchsreihen abzuschätzen (KAPITEL 3.9, SEITE 11).

Bei den eigenen Untersuchungen wurde dieser Gedanke aufgegriffen, die Bruchlastspielzahl eines nicht vorbeanspruchten Betons zu bestimmen. Während der Druckschwellbeanspruchungen wurde zyklisch der Verformungsmodul D ermittelt.

Über die zeitliche Änderung dieses Verformungsmoduls in der Ermüdungsphase II kann die Bruchlastspielzahl abgeschätzt werden. Die Phasen II stellen einen beanspruchungs- und materialabhängigen Bereich stabiler Verformungszuwächse dar.

Es ist somit möglich, über die zeitliche Verformungsmodulabnahme in Phase II die Bruchlastspielzahl von Beton zu ermitteln. Dabei haben Frequenz, Lagerungsbedingungen, Zusammensetzung, Betonart/-festigkeitsklasse, Feuchtigkeitsgehalt und Belastungshöhe keinen Einfluss.

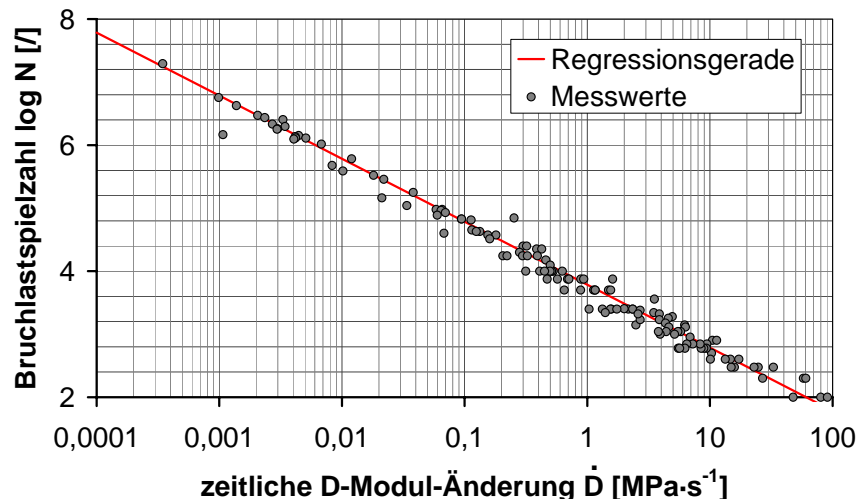


Abbildung 57: Doppeltlogarithmische Darstellung der \dot{D} - N - Beziehung, Phase II

Die Beziehung zwischen der zeitlichen D-Modul-Änderung \dot{D} und der Lebensdauer N ergibt in doppeltlogarithmischer Darstellung eine Gerade (ABBILDUNG 57) mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,986$. Das Diagramm beinhaltet die Ergebnisse von Normalbeton, Recyclingbeton, hochfestem Beton, verschiedenste Festigkeitsklassen und Probekörperform. Die Funktion der Regressionsgeraden der einzelnen Messwerte lautet:

$$N = 6000 \text{ MPa/s} \cdot \dot{D}^{-1} \quad (4.5)$$

4.5.5.4 Abschätzung durch statische Kennwerte

Die Frage der Abschätzung der Bruchlastspielzahl durch statische Kennwerte ergab, dass bei Beanspruchungshöhen unterhalb der kritischen Spannung $\sigma_o < \sigma_{krit}$, die mittleren Bruchlastspielzahlen eines Beanspruchungsniveaus (ABBILDUNG 59) und der Mittelwert der rechnerischen Bruchdehnung $\varepsilon_{b,r}$, als Reziprokwert dargestellt (Abbildung 58: Reziproker Wert der Bruchdehnungen), einen affinen Verlauf aufweisen. Die rechnerische Bruchdehnung $\varepsilon_{b,r}$ ergibt sich aus der Betonsteifigkeit und der Zylinderdruckfestigkeit.

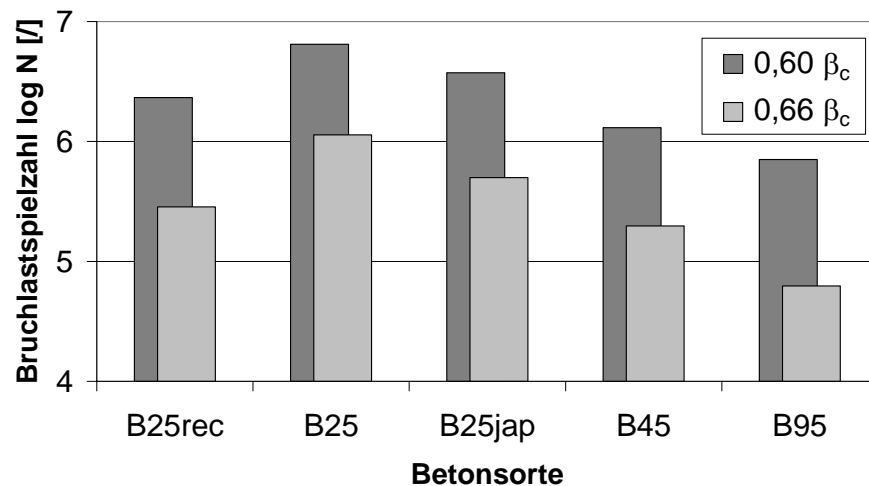


Abbildung 59: Mittelwerte der Bruchlastspielzahlen ($\sigma_o < \sigma_{krit}$)

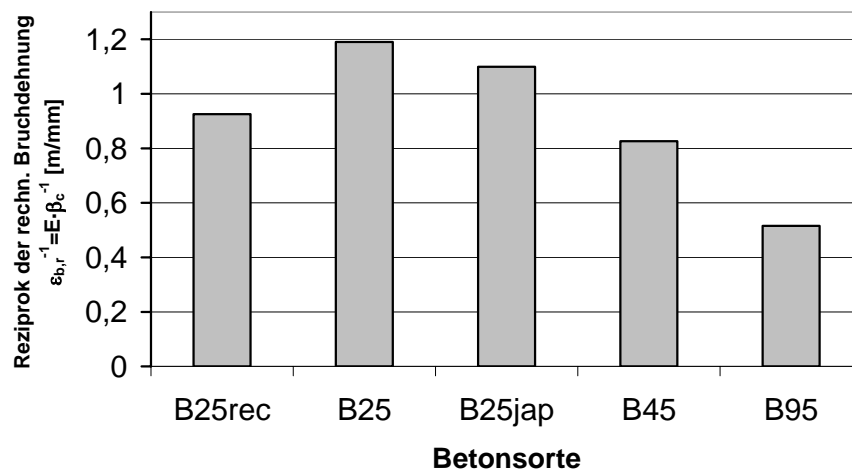


Abbildung 58: Reziproker Wert der Bruchdehnungen

Trägt man die ermittelte Bruchlastspielzahl $\log N$ über dem Reziprokwert der rechnerischen Bruchdehnung auf, so ergibt sich ein gradliniger Verlauf der Ergebniswerte der entsprechend der Beanspruchungshöhe parallel verschoben ist (ABBILDUNG 60). Die Ermüdungsfestigkeit der Betonsorten hängt in dem Beanspruchungsbereich von der Bruchdehnung ab.

Druckschwellbeanspruchungen mit Oberspannungen $\sigma_o \geq \sigma_{krit}$ stellen eine Kurzzeitbeanspruchung dar. In diesem Beanspruchungsbereich ist der Einflussunterschied der statischen Bruchfestigkeit gering. Die erreichbare Bruchlastspielzahl ist von der Belastungshöhe und Betonsteifigkeit abhängig.

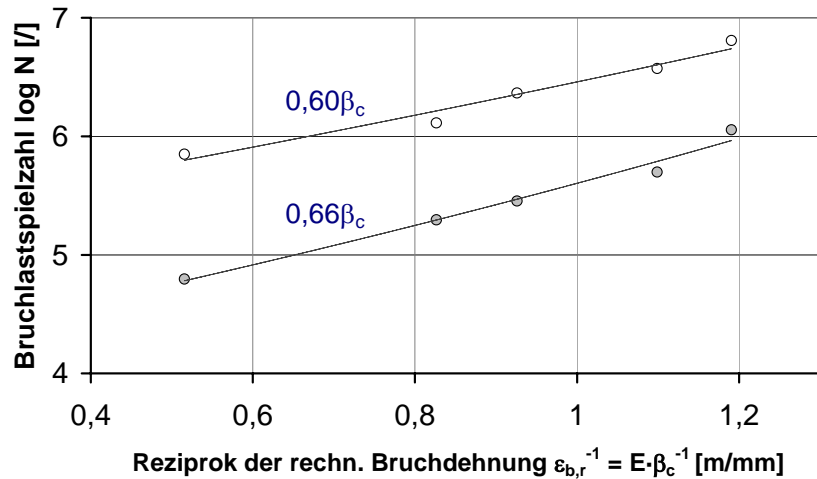


Abbildung 60: Reziproker Wert der rechnerischen Bruchdehnung $\varepsilon_{b,r}$ zur dynamischen Bruchlastspielzahl $\log N$ ($\sigma_o < \sigma_{krit}$)

4.5.6 Zerstörungsfreie Beobachtung der Ermüdung

Der Verlauf der Ermüdung, d.h. der Schädigungsfortschritt, ist auch mit Hilfe einer Ultraschall-Laufzeitmessung beobachtet worden [88]. Die Untersuchungen ließen erkennen, dass sich die Bruchlastspielzahl über die zeitliche Veränderung der Ultraschall-Laufzeit abschätzen lässt (SIEHE KAPITEL 4.4.6, SEITE 29).

Während des Ermüdungsvorganges steigt mit zunehmender Schwingungszahl die Laufzeit $L_{t_{US}}$ infolge einer konstanten Gefügeschädigung bis zu einer Lebensdauer von rund $0,8 \cdot N$ (Eintritt in die Phase III) zunächst leicht linear und danach überproportional an (ABBILDUNG 61). Die Verlaufsbandbreite von minimalen und maximalen ermittelten Laufzeiten vergrößert sich mit der Lebensdauer. Die Laufzeitänderung stellt ein Maß der Schädigung des dynamisch beanspruchten Betons dar.

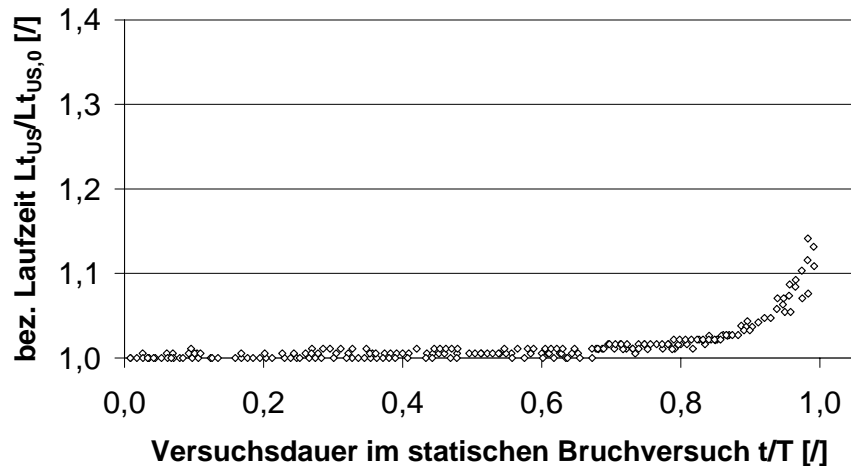


Abbildung 61: Laufzeitbild von zuvor unbeanspruchtem Beton

Die zerstörungsfreie Betrachtung lässt vermuten, dass die ermittelte Laufzeitsteigerung weitestgehend durch die Rissentstehung, -entwicklung und -öffnung hervorgerufen wird. Die auftretende reine Querdehnungsänderung ist so klein, dass diese kaum ohne Risswachstum vom angewandten Ultraschallmessverfahren aufgezeigt werden könnte. Eine Laufzeitveränderung des Ultraschallimpulses ist hierbei rechnerisch unter idealen Bedingungen erst ab einer Querdehnungsveränderung von ca. 5 mm/m registrierbar. Die „normale“ Querdehnung von Beton liegt weit unter diesem Wert. Bekräftigt wird diese Vermutung durch die Gegebenheit, dass bei der Laufzeitbetrachtung im Gegensatz zur Dehnungsbetrachtung anfangs in Phase I der starke beanspruchungshöhenabhängige Anstieg der Kurve fehlt.

4.5.7 Nachweis einer dynamische Vorschädigung

An zuvor zyklisch-mechanisch-, statisch-mechanisch- und unbeanspruchtem Beton wurde die Änderung der Ultraschall-Laufzeit während statischer Bruchversuche verfolgt [88]. Damit war es möglich, eine zyklisch-mechanische Vorschädigung zu diagnostizieren.

Die Verlaufsbeobachtungen der Ultraschall-Laufzeit bei den kraftgeregelten statischen Bruchversuchen sind im Folgenden zusammengefasst.

Bei einem unbeanspruchtem Beton (0,0·N) ist kaum eine Laufzeitänderung bis kurz vor dem Versagen zu erkennen. Dort bleibt die Laufzeit bis über die maximale Bruchfestigkeit auf einem Niveau und steigt kurz vor dem Versagenseintritt in Phase III rapide an. Der Verlauf der Laufzeitenänderungskurven von zuvor statisch dauerstandbeanspruchten Probekörpern (0,3·N und 0,8·N) ist vergleichbar mit denen eines unbeanspruchten Betons, aber je nach Vorbeanspruchungsintensivität auf einem anderen Laufzeitniveau verschoben (ABBILDUNG 62). Die Höhe der Laufzeitänderungen stellen ein Maß für die Schädigung des Betongefüges dar.

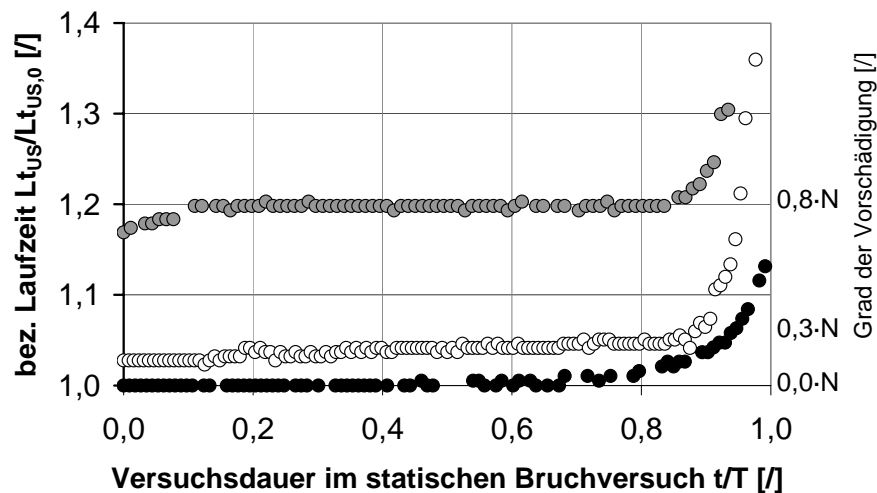


Abbildung 62: Laufzeitbild von zuvor druck- und unbeanspruchtem Beton

Die gemessenen Änderungen der Laufzeit beim statischen Bruchversuch entstehen durch Rissöffnung, strukturelle Schädigung des durchschallten Gefüges und daraus resultierender Zunahme der Reflektionen der Ultraschallimpulswellen.

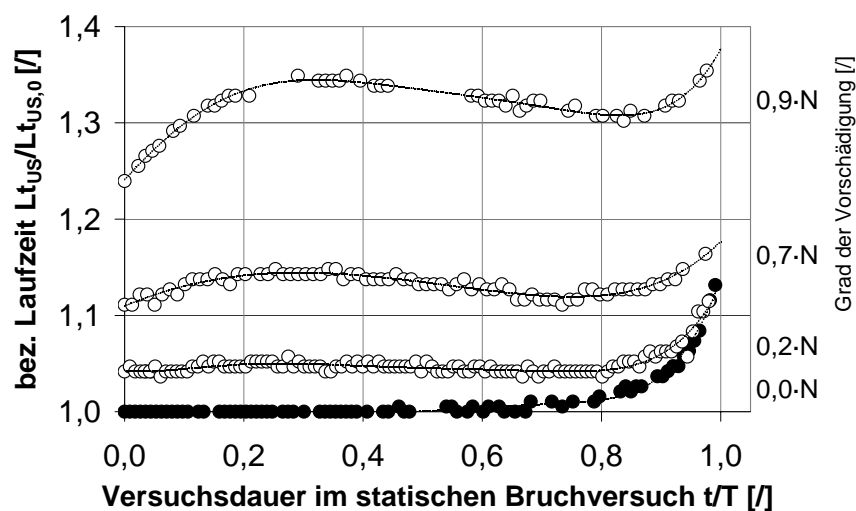


Abbildung 63: Laufzeitbild von zuvor schwingbeanspruchtem Beton

Werden die beim Bruchversuch aufgenommenen Laufzeitkurven von zyklisch-mechanisch vorbeanspruchtem Beton betrachtet, so zeigt sich, dass zyklisch-mechanisch und statisch

vorbeanspruchter Beton abweichende Laufzeitänderungskurven aufweisen (ABBILDUNG 63). Die Laufzeit von zyklisch-mechanisch beanspruchtem Beton fällt vor dem Versagen zunächst etwas ab. Bei statischer Vorschädigung ist ein solcher Wiederabfall der Laufzeit nicht zu beobachten. Dies lässt darauf schließen, dass der veränderte Laufzeitverlauf aus den Horizontalrissen resultiert, welche bei zyklisch-mechanischer Beanspruchung entstanden. Die Verlaufsumkehr ist mit Beginn der Phase II zu erkennen. Die Intensität nimmt mit steigendem Schädigungsgrad zu.

Diese voneinander abweichenden Laufzeitänderungs-Verläufe sind auf die unterschiedlichen Rissverläufe in der Matrix zurückzuführen. Statisch vorgeschädigter Beton ist entsprechend seiner Vorbeanspruchung vorwiegend parallel zur Kraftachse gerissen. Eine Wiederbelastung stellt eine Weiterführung der Rissstrukturen dar.

Im dynamisch vorgeschädigten Beton verlaufen Risse zusätzlich senkrecht zur Spannungsachse, welche bei einer statischen Druckfestigkeitsprüfung überdrückt werden. Der Verlauf der aufgezeichneten Laufzeit während eines statischen Bruchversuches stellt eine Überlagerung aus Laufzeiterhöhung und Laufzeitverminderung dar. Die Laufzeit wird durch den Abstieg der Verformung und Vertikalrissöffnung erhöht und gleichzeitig durch eine Verminderung der Wellenreflexion infolge Horizontalrisschließung und Erhöhung des Impulsdurchganges verringert.

4.5.8 Steifigkeitsabnahme bei der Ermüdung

Durch die Extrapolation der zuletzt gemessenen Steifigkeiten vor dem Ermüdungsversagen kann ein Kurvenverlauf prognostiziert werden, welcher eine Beurteilung der Versagenssteifigkeit bei einer bestimmten Beanspruchungshöhe ermöglicht und auf die Existenz einer Dauerschwingfestigkeit bei Beton hindeutet.

In ABBILDUNG 64 sind die ermittelten Versagens-Verformungsmoduln D_N und Anfangs-Verformungsmoduln D_0 , welche vor der Ermüdungsbeanspruchung bestimmt wurden, über die Beanspruchungshöhe aufgetragen.

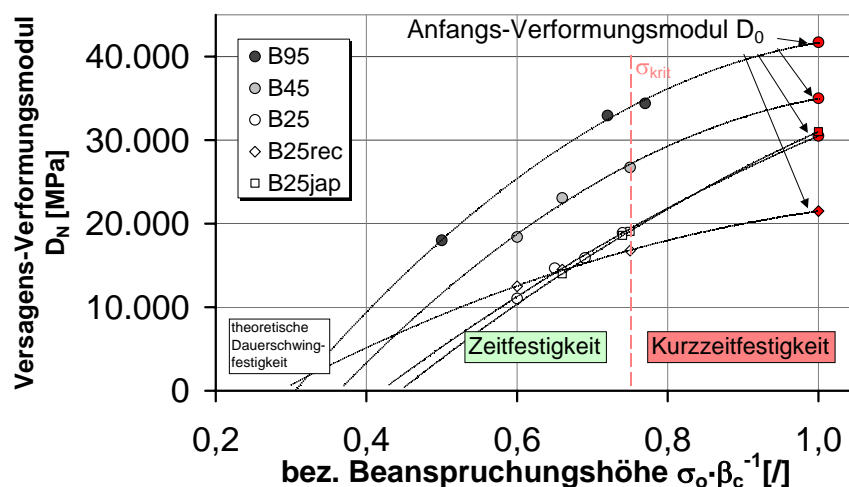


Abbildung 64: Charakteristische Versagenslinie der Betonermüdung

Die Untersuchungen zeigten, dass die Abnahme des Verformungsmoduls durch die dynamischen Einwirkungen mit Ausnahme des Recyclingbetons entsprechend dem Anfangs-Verformungsmodul verlaufen. Die Versagenslinie des Recyclingbetons weist, infolge des höheren Matrixanteils und des geringeren E-Moduls, einen abweichenden Verlauf mit geringerer Steigung auf.

Bei Verringerung der Ermüdungsbeanspruchungen kommt es zu einer feinen Mikrorissverteilung über das gesamte Betongefüge und damit zu einem immer geringeren Versagens-Verformungsmodul. Dauerschwingfest ist der Beton ab einer Beanspruchungshöhe, die kein Risswachstum hervorruft.

Eine Extrapolation der einzelnen Verformungsmodulkurven ($\sigma_o < \sigma_{krit}$) ergibt einen Schnittpunkt der Versagenslinie mit der auf der Abszisse aufgetragenen Beanspruchungshöhe. Dieser Schnittpunkt lässt sich als Dauerschwingfestigkeit interpretieren. Wird der Beton unter dieser Grenze beansprucht, so würde

dieser erst bei einem negativen Verformungsmodul, welcher nicht existiert, versagen. Somit würde das innere Verformungsvermögen des Betons ausreichen, die Ermüdungsbeanspruchungen theoretisch unendlich oft bzw. schadenfrei aufzunehmen. Es kommt zu keinem Risswachstum durch geringe aufgebrauchte Spannung. Danach liegt diese hypothetische „Dauerschwingfestigkeit“ je nach Betongüte zwischen $0,30 \beta_c$ und $0,45 \beta_c$. Alle höheren Beanspruchungen würden zwangsläufig zu einem Versagen führen.

Aus statischen Bruchversuchen ist bekannt, dass sich Beton bei niedriger Beanspruchung nahezu elastisch verhält. Bleibende Verformungen, d.h. eine nachweisbare Rissbildung im Beton ist sicher erst über $\sim 0,30 \beta_c$ nachzuweisen (SIEHE KAPITEL 3.11, SEITE 13).

Es zeigt sich zudem, dass ab einer Beanspruchung von rund $0,75 \beta_c$ die ermittelten Versagens-Verformungsmodul-Werte vom Verlauf der charakteristischen Versagens-Grenzlinsen abweichen und leicht abfallen.

Mit Hilfe dieser Erkenntnis ist es möglich durch Ermüdungsversuche, der Ermittlung von Anfangs- und markanten Versagens-Verformungsmodulwerten, dem Aufstellen einer solchen charakteristischen Versagenslinie, einen beliebigen Verformungsmodul für eine entsprechende Beanspruchungshöhe des Betons abzuschätzen. Mit Kenntnis der zeitlichen Abnahme des Verformungsmoduls ist darüber hinaus eine Vorhersage der Lebensdauer möglich. Der Verlauf der Versagenslinie ist aber von Parametern, wie z. B. der Frequenz, abhängig. Die dargestellten Ergebniswerte beziehen sich auf eine Beanspruchungsfrequenz von 10 Hz. Ein Einfluss der Frequenz und des Feuchtigkeitsgehalts konnte diesbezüglich nicht gesichert berücksichtigt werden. Die nachfolgenden Ergebnisse des Frequenzeinflusses (ABBILDUNG 65) zeigen daher nur Tendenzen auf.

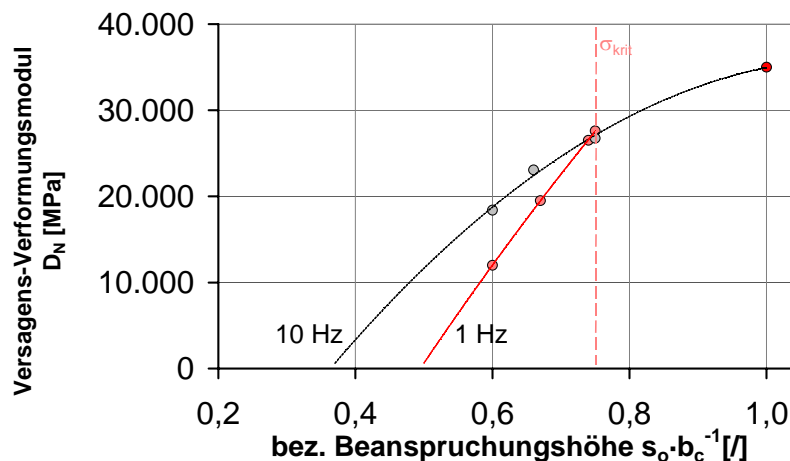


Abbildung 65: Frequenzeinfluss bei der charakteristischen Versagens-Grenzlinie der Betonermüdung

Die Beanspruchungsfrequenz hat einen Einfluss auf den Versagens-Verformungsmodul bei bestimmter Belastungshöhe.

Bei einer Beanspruchungsfrequenz von 1 Hz und 10 Hz ist, bei einer Beanspruchungshöhe von $\sigma_0 = \sigma_{krit} \approx 0,75 \beta_c$, der Versagens-Verformungsmodul gleich. Nach überschreiten der kritischen Spannung σ_{krit} kommt es bei der geringeren Frequenz 1 Hz zu einem rapideren Abfall des Versagens-Verformungsmoduls auf ein gleichbleibendes Niveau.

Unter der kritischen Spannung σ_{krit} ist bei 1 Hz im Vergleich zu der 10 Hz-Beanspruchung ein stärkerer Abfall des Versagens-Verformungsmoduls zu beobachten. Demzufolge liegt auch die vermeintliche Dauerschwingfestigkeit bei einer geringeren Beanspruchungsfrequenz höher, bei rund $0,50 \beta_c$.

Der Anstieg der Beanspruchungshöhe erklärt sich damit, dass niederfrequente Druckschwellbeanspruchungen in die Richtung der statischen Dauerstandsbeanspruchung tendieren und die Ruhephasen zeitlich ausgeprägter sind. Verformungen können bei der Entlastung stärker abgebaut werden. Zyklisch-mechanische Beanspruchungen über die kritische Spannung hinaus, wirken wie statische Bruchversuche und führen aufgrund der langen hohen Beanspruchung und der resultierenden Kriechverformung zu einem schnellen Versagen.

4.5.9 Bruchbilder

Die durch die Ermüdungsversuche hervorgerufenen Bruchbilder stellten sich als ein Schubbruch, ein Doppelpyramidenbruch oder eine Mischung daraus dar. Der Bruch wurde in der Regel durch eine ausgeprägte Rissbildung angekündigt. Die Risse verliefen weitestgehend im mittlerem Bereich des Probekörpers und vorwiegend in Krafrichtung.



Abbildung 67: Betonsegmente

Bei geringer Beanspruchung entstanden im mittleren Bereich der Probekörper beim Bruch kleine Betonsegmente (ABBILDUNG 67). Das Betongefüge war in diesem Bereich vom Randbereich zum Kern sehr geschädigt und bröselig. Bei hoher Beanspruchung waren ausgeprägtere Vertikalrisse zu beobachten. Der Beton wurde in einzelne tragfähige Säulensegmente gespalten (ABBILDUNG 66).



Abbildung 66: Rissbild bei hoher Beanspruchung ($\sigma_0 \geq 0,75 \beta_c$)

4.5.10 Versagensbetrachtung

Es konnte beobachtet werden, dass der Versagensprozess im Bereich der größten Verformungsänderung am Querschnittsrand beginnt und von außen nach innen verläuft. Der Versagensprozess, d.h. die Phase III, beginnt mit der Entstehung von axialen Versagensrissen im Randbereich der druckschwellbeanspruchten Betone bei rund $0,9 \cdot N$. An der Betonoberfläche sind sichtbare Risse und Abplatzungen zu beobachten. Diese äußeren Schädigungen des Gefüges bewirken eine Verminderung der Tragfähigkeit und eine Verschiebung der Spannungsverteilung zum Kernbereich hin.

Durch den nach innen gerichteten Rissfortschritt verkleinert sich die lastübertragende Fläche des Betonquerschnittes und die Spannung nimmt bei gleichbleibender Kraft zu. Der Rissentwicklungs- und Zermürbungsprozess erfährt dadurch eine überproportionale Beschleunigung. Der Beton versagt aufgrund der Verminderung des tragenden Querschnittes und dem Überschreiten der Bruchfestigkeit.

Die Ergebnisse der Restfestigkeitsuntersuchung (KAPITEL 4.2.1, SEITE 22) unterstützen diese Beobachtungen. Die Restfestigkeit nimmt erst mit dem Erreichen der Phase III ab.

ABBILDUNG 68 zeigt einen in der Mitte quer zur Spannungsachse aufgeschnittenen bis in Phase III dynamisch beanspruchten Probekörper. Der Randbereich weist gut sichtbare Matrixschäden und ein auf Makro-Ebene ungerissenen Kernbereich auf.



Abbildung 68: Rissbild eines Ermüdungsbeanspruchten Betons

4.5.11 Ermüdungsfestigkeit von hochfestem Beton und Recyclingbeton

Die Ergebnisse des geprüften hochfesten Betons B 95 stimmen mit denen der Normalbetone überein.

Es ist zu beobachten, dass der hochfeste Beton

- eine gering ausgeprägte Phase III hat. Der Verlauf der Ermüdungslinie mit seinen drei Phasen ist ansonsten vergleichbar mit Normalbeton;
- aufgrund der Sprödigkeit den geringsten Verformungsmodulabfall aufweist (ABBILDUNG 64 , SEITE 53);
- im Gebrauchszustand - im Oberspannungsbereich bis zur kritischen Spannung $\sim 0,75 \beta_c$ – einen deutlich geringeren Ermüdungswiderstand hat als ein Normalbeton (KAPITEL 4.5.3.2, SEITE 37);
- bei einer sehr hohen Beanspruchung $\sigma_o > 0,75 \beta_c$ im Vergleich zum Normalbeton aufgrund seines hohen Elastizitätsmoduls einen hohen Ermüdungswiderstand hat (KAPITEL 4.5.3.2, SEITE 37);
- die Streuung der Bruchlastspielzahl pro Beanspruchungsserie im Vergleich zum Normalbeton mit niedrigem E-Modul geringer schwankt (KAPITEL 4.5.3.3, SEITE 38);
- infolge seines dichten strukturellen Gefügebau die geringste Änderung der Ermüdungsfestigkeit bei Wasserlagerung zeigt (KAPITEL 4.5.3.6, SEITE 41).

Das Ermüdungsverhalten des Recyclingbetons B 25rec ist grundsätzlich mit dem eines Normalbetons zu vergleichen. Der Recyclingbeton wies lediglich im Vergleich zu den mit untersuchten Betonen, bei gleicher Beanspruchung, geringere Versagensdehnungen auf.

4.5.12 Dauerstandversuche

Begleitend zu den Druckschwelluntersuchungen wurden Dauerstandsuntersuchungen durchgeführt (KAPITEL 4.3.2, SEITE 26). Die Ergebnisse sind in der TABELLE 11, SEITE 33 aufgelistet.

Ein Vergleich von Dauerstands- und Ermüdungsversuchen mit gleichem Versagenscharakter gestaltet sich aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchungsart, des viskoelastischen Betonverhaltens und durch verschiedene Schädigungsmechanismen schwierig.

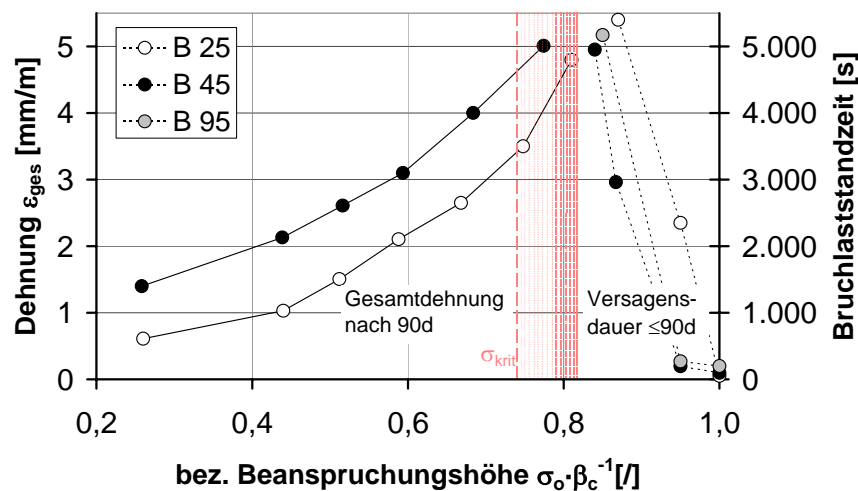


Abbildung 69: Kriechverformung und Standzeit unter Dauerbeanspruchung

Grundsätzlich tritt ein Betonversagen unter konstanter Dauerlast in der Regel nur bei sehr hohen Beanspruchungen auf. Im Bereich der Gebrauchsspannungen kriecht der Beton je nach Art und Beanspruchungshöhe. Die Kriechdehnungen können dabei mehr als das Vierfache der Bruchdehnung betragen.

Trägt man die ermittelten Dauerstandsergebnisse: Gesamtdehnung (Ordinate links) und die zum Versagen führende Standzeit (Ordinate rechts) über die Spannungshöhe in ein Diagramm ein (ABBILDUNG 69), so erhält man durch die asymptotische Annäherung von Gesamtdehnung und Bruchlaststandzeit einen Bereich, der sich als Dauerstandsfestigkeitsbereich interpretieren lässt. Überschreitet die aufgebrachte

Dauerspannung diesen Spannungsbereich so führt dies zum Versagen. Dauerstands- und Ermüdungsversuche zeigen bei hoher Beanspruchung affine strukturelle Schädungsverläufe, welche durch den Eintritt in die Phase III zum Versagen führen.

Bei den Dauerstandversuchen wird eine Oberspannung von $\sigma_o > \sigma_{krit}$ benötigt, um den Schadensverlauf zu verursachen.

Eine weitergehende Betrachtung ergab, dass hoch dauerstandsbeanspruchter Beton $\sigma_o > \sigma_{krit}$ und dauerschwingbeanspruchter Beton übereinstimmende Restfestigkeitsverläufe (ABBILDUNG 70) sowie vergleichbare Verläufe von Steifigkeitsverlust (ABBILDUNG 71) und Verformungszuwachs haben. Die Ergebniswerte sind in Tabelle 12, SEITE 33 dargestellt.

Bei den untersuchten Betonen liegt die Dauerstandfestigkeit bei rund $0,80 \beta_c$ für den B45 und leicht höher bei etwa $0,85 \beta_c$ für den B25. Diese Spannungshöhen entsprechen dem Wendepunkt der Volumenänderungslinie $\Delta V/V$, welche den Bereich der kritischen Spannung kennzeichnet.

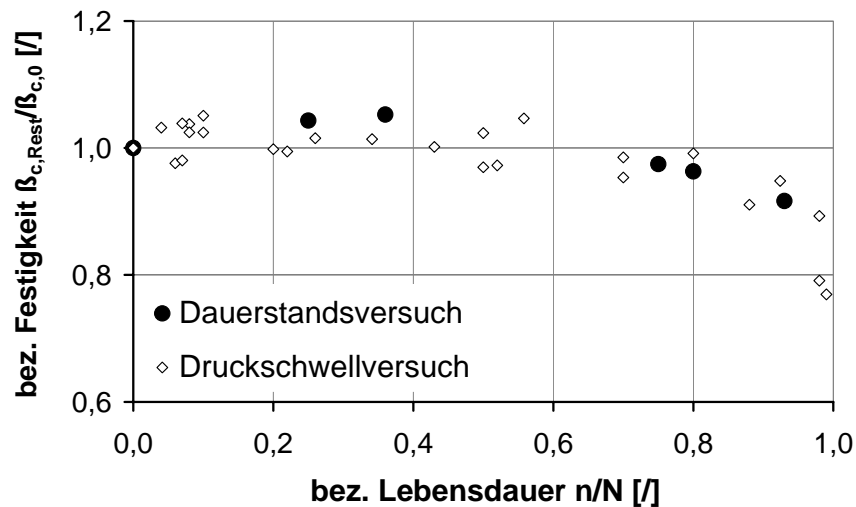


Abbildung 70: Restfestigkeit bei Dauerstand- und Druckschwellbeanspruchung

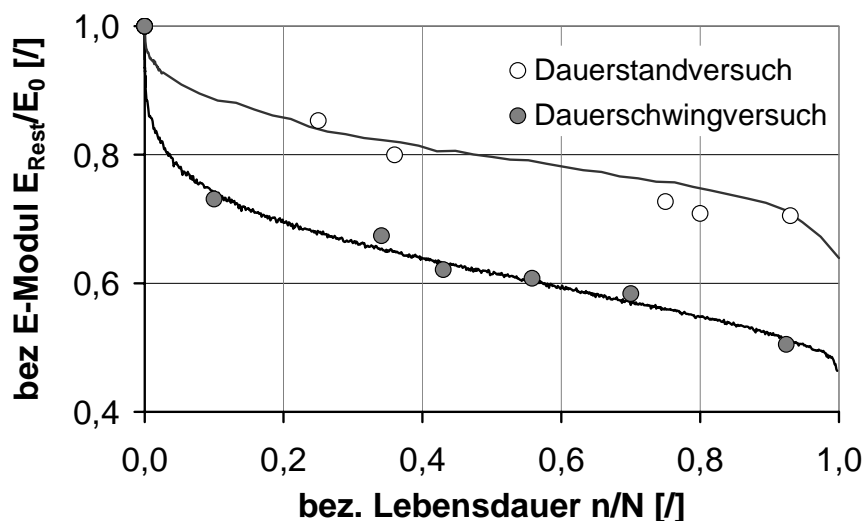


Abbildung 71: Reststeifigkeitsverlauf bei Dauerstand- und Druckschwellbeanspruchung

5 Zusammenfassung

Ingenieurbauwerke, wie Brücken, Bahntrassen, Hochhäuser und Off-Shore-Konstruktionen sind in Einzelfällen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen von bis zu 80 Hz ausgesetzt, die den Konstruktionsbeton ermüden und zu Frühschäden oder zu einem vorzeitigen Versagen der Gebrauchsfähigkeit führen können. Daher ist eine Betrachtung der Ermüdungswiderstandsfähigkeit bzw. die Ausrichtung des Baustoffs auf die Anforderungen bei ermüdungsgefährdeten Betonbauwerken unumgänglich, um die Gebrauchsdauer einschätzen und regulieren zu können.

Die vorliegende Arbeit befasste sich mit der Abschätzung der Lebensdauer von sinusförmig druckschwellbeanspruchtem Beton, den Ermüdungseinflüssen und dem Nachweis von ermüdungsbedingten Betonschädigungen. Maßgebend für die Lebensdauerbeschreibung waren die Betonkennwerte und Parameter: E-Modul, Verformungsverhalten, Belastungshöhe, Frequenz und Feuchtigkeitszustand. Die Unterspannung der Ermüdungsversuche lag konstant bei $\sim 2,0$ MPa und die Oberspannung zwischen 50 % und 87 % der Zylinderseriendruckfestigkeit β_c . Die Untersuchungen beschränkten sich aus zeitlichen und maschinell-technischen Gründen auf den Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 20 Hz.

Voruntersuchungen zeigten, dass sich die Betonermüdung durch die zeitliche Änderung der Steifigkeit, nicht aber durch die zeitliche Änderung der Festigkeit nachweisen bzw. beobachten lässt. Die im statischen Versuch ermittelte Bruchfestigkeit von zuvor zyklisch-mechanisch beanspruchtem Beton wird durch einen Ermüdungsfortschritt nicht nachhaltig beeinträchtigt, die Festigkeit bleibt bis kurz vor dem Versagen nahezu konstant. Das Verformungsvermögen hingegen nimmt mit zunehmender Dauerschwingbeanspruchung ab. Das Versuchsprogramm und die Abschätzung der Lebensdauer wurde auf die Erkenntnisse der Vorversuche ausgerichtet. In die sinusförmige Druckschwellbeanspruchung wurde eine Prozedur eingegliedert, mit welcher die zeitliche Steifigkeitsänderung, während der zyklisch-mechanischen Schwingbeanspruchung, ermittelt wurde.

Diese Ermüdungsversuche mit zyklischer Steifigkeitsermittlung zeigten, dass eine Abschätzung der Lebensdauer von Beton durch die zeitliche Änderung der Steifigkeit in Phase II möglich ist. Die zeitliche Änderung der Steifigkeit beinhaltet die Einflussfelder, wie Beanspruchungshöhe, Frequenz, Betonart, Feuchtigkeitszustand, Ruhephasen und Betonart. Die zeitliche Änderung der Steifigkeit lässt sich durch Verformungsmessungen, aber auch mit Hilfe von Ultraschall-Laufzeitmessungen ermitteln. Damit wird eine direkte Überwachung des Ermüdungsverlaufes an Bauwerken möglich.

Es gelang, ohne langwierige Ermüdungsversuche, das relative Ermüdungsverhalten mittels mechanischer Betonkennwerte abzuschätzen. Es konnte im Beanspruchungsbereich bis zur kritischen Spannung mit Hilfe der Anfangssteifigkeit und der Bruchfestigkeit, welche eine rechnerische Bruchdehnung ergibt, die Ermüdungsneigung bzw. -widerstandsfähigkeit wiedergegeben werden.

Die Art der Vorbeanspruchung (statisch oder zyklisch-mechanisch) konnte mit Hilfe einer Ultraschall-Laufzeitmessung während eines statischen Bruchversuches durch Unterschiede im Verlauf der Laufzeitänderungen diagnostiziert werden. Die Laufzeit von zuvor zyklisch-mechanisch beanspruchtem Beton steigt beim statischen Bruchversuch anfänglich an und fällt vor dem Versagen etwas ab. Ein solcher Wiederabfall der Laufzeit ist bei einer statischen Vorschädigung nicht zu beobachten.

Die Extrapolation der ermittelten Steifigkeiten vor dem Ermüdungsversagen ergab einen Kurvenverlauf, der auf die Existenz einer Dauerschwingfestigkeit bei Beton hindeutet. Diese Dauerschwingfestigkeit lag je nach Beton zwischen $0,30 \beta_c$ und $0,45 \beta_c$. Ein praktischer Nachweis gestaltet sich aufgrund einer extrem langen Versuchsdauer als schwierig. Im untersuchten Beanspruchungsbereich von $\sim 0,75 \beta_c$ bis $\sim 0,50 \beta_c$ stiegen die Versagensverformungen mit abnehmender Oberspannung linear an. Es war kein Anzeichen für eine Dauerschwingfestigkeit erkennbar.

Ein weiterer Teil der Untersuchungen war die Beschreibung der Wirkung von Einflussfaktoren auf die Bruchlastspielzahl. Es zeigte sich, dass sich die Wirkung der Einflüsse bei luftgelagertem Beton bei einer Beanspruchungshöhe von $\sigma_o \approx 0,75 \beta_c$ und bei wassergelagertem Beton bei rund $0,55 \beta_c$ im Bereich der kritischen Spannung umkehrt. Bei Beanspruchungen unterhalb der kritischen Spannung nimmt die Bruchlastspielzahl mit steigender Frequenz ab und darüber nimmt sie mit steigender Frequenz zu. Die

Bruchlastspielzahl wird von der Frequenz nur in einem begrenzten Bereich, zwischen ca. 0,1 Hz und 10 Hz, beeinflusst. Eine solche Einflussumkehr zeigte sich auch bei der Untersuchung von Ruhephasen in der Dauerschwingbeanspruchung. Aus der Literatur ist bekannt, dass durch Ruhephasen die Bruchlastspielzahl ansteigt. Dieses konnte für Beanspruchungen unterhalb der kritischen Spannung bestätigt werden. Die Bruchlastspielzahl hat sich mehr als verdoppelt. Bei Beanspruchungen oberhalb der kritischen Spannung aber verringert sich die Bruchlastspielzahl. In diesem Fall hat sie sich mehr als halbiert.

Des Weiteren ergaben die Ermüdungsversuche, dass wassergelagerte Betone im Vergleich zu den luftgelagerten eine bis zu 10^3 -fach kleinere Bruchlastspielzahl haben. Der Einfluss nahm mit dem absoluten Feuchtigkeitsgehalt, mit sinkender Porosität und kleiner werdendem effektiven Wasser-Zement-Wert ab. Ein Größtkornunterschied einer Festigkeitsklasse von 8-er und 16-er Korn spielte keine erkennbare Rolle. Bei der Betrachtung der Beanspruchungsgeschwindigkeit und der Bruchlastspielzahl konnte ebenfalls keine direkte Korrelation erkannt werden. Der hochfeste Beton gliederte sich in die Ermüdungsbetrachtungen der normalfesten Betone ein. Der Recyclingbeton wies dagegen ein leicht abweichendes Ermüdungsverhalten auf. Gründe dafür sind vermutlich die stark unterschiedliche Zusammensetzung und der höhere Matrixanteil. Zyklisch-mechanische Beanspruchungen führen, im Gegensatz zu statischen Dauerbeanspruchungen, ab einer geringen Beanspruchungshöhe zum Versagen. Beim Überschreiten der kritischen Spannung versagt der Beton immer, egal ob er einer zyklisch-mechanischen oder statisch-mechanischen Dauerbeanspruchung unterliegt.

Abschließend ist zu sagen, dass eine allgemeingültige Lebensdauerbetrachtung, wie sie für Stahl existiert, für Beton nicht in der bekannten klassischen Form möglich ist. Es wird aufgrund der zahlreichen in Wechselwirkung stehenden Einflussparameter, wie beispielsweise der Beanspruchungshöhe, -frequenz, -geschichte sowie Steifigkeit, Betonzusammensetzung, Betonfeuchtigkeit, Gefügeporosität, Betonart und -festigkeitsklasse und der starken strukturellen Unterschiede des inhomogenen Mehrstoffsystems Beton bei der Abschätzung der Bruchlastspielzahl immer zu großen Streuungen kommen. Eine Modellierung kann nur für einen abgegrenzten definierten Bereich gelten. Daher sollte vorrangig nicht das Ziel sein, mit Hilfe allgemeingültiger komplexer Modelle die Betonermüdung zu simulieren, sondern es ist erfolgversprechender, sich auf den Werkstoff zu konzentrieren und durch Prüfserien mit Hilfe noch zu definierender Verfahren, z.B. basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit, die Ermüdungsneigung der jeweiligen Betonsorte unter praxisnah abzusteckenden Randbedingungen zu bestimmen.

6 Ausblick

Die Untersuchungen lassen einen gewaltigen weiterführenden Forschungsbedarf - bezüglich der im Stellenwert wachsenden Betonbauwerksschädigung durch Ermüdung - erkennen.

Es erscheint erforderlich, weitere gezielte Ermüdungsuntersuchungen durchzuführen, um die zahlreichen Einflussfelder und deren Wechselwirkungen bezüglich der Betonermüdung zu untersuchen. Betrachtet werden sollte beispielsweise das Querdehnungsverhalten, der Einfluss von Umgebungsklima und Betonfeuchtigkeit sowie der Einfluss der Zusammensetzung, insbesondere der Einfluss des Matrixanteiles.

Umwelt- und äußere Beanspruchungen, wie Klima- oder Feuchtigkeits- und Temperaturuntersuchungen sind notwendig, um die direkt vorhandenen Umgebungseinflüsse zu beleuchten. Über das Ermüdungsverhalten von Betonen, wie selbstverdichtender oder ultrahochfester Beton gibt es keine Erkenntnisse.

Der Betrachtung, dass sich die Bruchlastspielzahl durch statische Werkstoffkennwerte abschätzen lässt, sollte weiter nachgegangen und untermauert werden, um ein vereinfachtes Verfahren zur Beurteilung der Ermüdungsneigung eines Betons zur Hand zu haben, mit dem die Lebensdauer bzw. die Bruchlastspielzahl ohne aufwendige Ermüdungsversuche abgeschätzt werden kann.

Für die praxisgerechte Simulation der Ermüdung ist der begrenzte Frequenzeinfluss und der Einfluss der Betonzusammensetzung (Matrixanteil) tiefergehend zu untersuchen. Es fehlen Erkenntnisse, wieweit der Einflussbereich sich auf den Werkstoff allgemeingültig übertragen lässt.

Es fehlt die Umsetzung der bestehenden Erkenntnisse in praktische Anwendungsfälle, wie an Brücken oder an der „Festen Fahrbahn“, um gezielt:

- die Gefährdung der Bauwerke und -konstruktionen zu verringern, die Gebrauchsfähigkeit zu erhöhen und die Auswirkungen dynamischer Beanspruchungen in statischen Berechnungsstrategien sicherer zu berücksichtigen und zu überprüfen;
- Betone zu entwickeln, welche aufgrund ihrer mechanischen Grundeigenschaften einen hohen Ermüdungswiderstand aufweisen sowie die geforderte Lebenserwartung unter dynamischer Beanspruchung erreichen;
- konstruktive Maßnahmen am Bauwerk bzw. Bauteil zu ergreifen, um die aus der dynamischen Beanspruchung resultierenden Schädigungsprozesse zu verlangsamen.

Es sollten anhand dieser und darauf aufbauender Untersuchungen Prüfmethode entwickelt werden, mit welchen man den Ermüdungswiderstand eines Betons beurteilen kann. Die Laborerkenntnisse sollten begleitend durch Monitoring - durch die Erfassung der zeitlichen Änderung des Verformungsmoduls an Bauwerken - auf Praxistauglichkeit überprüft werden.

Literatur

- [1] ACI-MANUAL OF CONCRETE PRACTICE, Part 4, Chapter 4, Design and analysis, 1984.
- [2] ALBERT, W.A.J.: Über Treibseile am Harz. Archiv für Mineralogie, Geognosie; Bergbau- und Hüttenkunde, 1837.
- [3] ANTRIUM, J.D.; MCCLAUGHIN, J.F.: Fatigue Study of Air – Entrained Concrete. Journal of the ACI, Proceedings 55, 1959, S. 1173.
- [4] ASSIMACOPOULOS, B.M.; WARNER, R.F.; EKBERG, C.E.: High Speed Fatigue Tests on Small Specimens of Plain Concrete. Journal of the PCI 4 (1959), S. 53. Awasd, M. E.; Hilsdorf, H.K.: Strength and Deformation Characteristics of Plain and Reinforced Concrete Subjected to High Repeated and Sustained Loads. Adeles Symposium, Fatigue of Concrete, ACI Publication SP-41, 1974
- [5] BACH, C.: Elastizität und Festigkeit. 8. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1920.
- [6] BAN, S.: Der Ermüdungsvorgang von Beton. Bauingenieur 14, 1933, S. 188.
- [7] BASQUIN, D.H.: The Exponential Law of Endurance Tests. Proceedings ASTM, 1910, S. 625-630.
- [8] BAZANT Z. P. SCHELL, W.F.: Failure Fracture of High-Strength Concrete and Size Effect, ACI Materials Journal, Vol. 90, No. 5, 1993.
- [9] BECHT, J.; EISENBLÄTTER, J.; JAX, P.: Werkstoffprüfung mit Schallemissionsanalyse (SEA), Zeitschrift für Werkstofftechnik, Heft 6, 1973, S. 306.
- [10] BENNETT, E.W.; MUIR, S.E.: Some Fatigue Tests of High – Strength Concrete in Axial Compression. Magazine of Concrete Research 19, 1967, S. 113.
- [11] BISCHOFF, P.H.; PERRY, S.H.: Compressive behaviour of concrete at high strain rates. Materials and Structures, Vol. 24, Nr.144, 1991, S. 425-450.
- [12] BREUGEL VAN, K.: Simulation of hydration an formation of structure in hardening cement-based materials, Diss. TU Delft, 1991.
- [13] BUNKE, N.: Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zur DIN 1048. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Nr. 422, Ernst & Sohn, Berlin, 1991.
- [14] CANGIANO, S; PLIZZARI, G.A.; SLOWIK, V.: Experimental investigations into the fatigue crack growth in concrete. Fracture Mechanics of Concrete Structures Proceedings FRAMCOS-3, 1998, S. 645-654.
- [15] CEB – FIP Model Code 1990: Comité Europe-International du Béton Bulletin D’Information No. 213/214, Lausanne, 1993.
- [16] CEB - RC-Elements under cyclic loading. CEB Bulletin No. 230, Thomas Telford LTD, London, 1996, S. 196.
- [17] CEB – State of the Art Report: Fatigue of Concrete Structures. CEB Bulletin D’Information, No. 188, 1988.
- [18] CORNELISSEN, H. A. W.: Fatigue Failure of Concrete in Tension. Heron, Vol. 29, Nr. 4, 1984.
- [19] CORNELISSEN, H. A. W.; REINHARDT, H.W.: Fatigue mechanics and structural aspects of concrete. Heron, Vol. 31, Nr. 2, 1986.
- [20] 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, 1984, S. 216-226.
- [21] CREPPS, R.: Fatigue of Mortar. Proceedings of the ASTM 23, II, 1923, S. 329.
- [22] CROSTACK, H.-A.: Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten von Punktschweißverbindungen mittels Schallemissionsanalyse, Dissertation, Uni Dortmund, 1976.
- [23] CURBACH, M.: Festigkeitssteigerung von Beton bei hoher Belastungsgeschwindigkeit. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1987.
- [24] DANIELEWICZ, I.: Zur Ermüdungsbemessung von Beton-Straßenbrücken, Dissertation, TH Darmstadt, 1994
- [25] DB AG: Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn. 3. überarbeitete Auflage Oktober 1995. DHIR, R.K.; SANGHA, C.M.: Development and propagation of microcracks in plain concrete. Materiaux et Constructions, Vol. 7, Nr. 37, 1974, S. 17.
- [26] DUDA, H.: Bruchmechanisches Verhalten von Beton unter monotoner und zyklischer Zugbeanspruchung. Schriftreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 419, Beuth-Verlag, Berlin, 1991.

- [27] DYDUCH, K., SZERSZEN, M., DESTREBECQ, J-F.: Experimental investigation of the fatigue of plainconcrete under high compressive loading, *Materials and Structures* No. 27, 1994, S. 505-509.
- [28] EWING, D.D.: *Fatigue of Concrete*, *Electric Railway Journal* 73, 1929, S. 829.
- [29] FRANZ, J.: Europäische Normungen zu Betonschwellen und Schienenbefestigungsstrukturen. *Der Eisenbahningenieur (EI)* 49, Nr. 5, 1998, S. 16-21.
- [30] FREITAG, W.: Das Ermüdungsverhalten des Betons. *Beton* 20, Nr. 5, 1970, S. 192-252.
- [31] FREUNDENTHAL, A.M.: *Inelastisches Verhalten von Werkstoffen*, VEB-Verlag Technik, Berlin, 1955.
- [32] GAEDE, K.: Versuche über die Festigkeit und die Verformung von Beton bei Druckschwellbeanspruchung. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 144, Beuth-Verlag, Berlin, 1962.
- [33] GALLOWAY, J.W., HARDING, H.M. UND RAITHBY, K.D.: Effects of moisture changes on flexural and fatigue strength of concrete. TRRL Laboratory Report No. 864, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, 1979.
- [34] GÖDDE, P.: *Rechnerische Untersuchungen zur Betonzugfestigkeit unter hoher Belastungsgeschwindigkeit*. Dissertation, Universität Dortmund, 1986.
- [35] GRAF, O.: Über die Elastizität der Baustoffe. *Bautechnik*, 1926, S. 492.
- [36] GRAF, O.: Versuche über die Druckelastizität von Basalt, Gneis, Muschelkalk, Quarzit, Granit, Buntsandstein sowie Hochofenschlacke. *Beton und Eisen*, Nr. 25, 1926, S. 399.
- [37] GRAF, O.; BRENNER, E.: Versuche zur Ermittlung der Widerstandsfähigkeit von Beton gegen oftmals wiederholte Druckbelastung. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 76 und 83.
- [38] GRAY, W.H.; MCLAUGHIN, J.F.; ANTRIM, J.D.: Fatigue Properties of Lightweight Aggregate Concrete. *Journal of the ACI. Proceedings* 58, 1961, S. 149.
- [39] GUENOT-DELAHAIE, I. : Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton, *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, série ouvrages d'art OA25*, Paris, France, 1997, S.180.
- [40] GUSTAFSSON, P.J.: *Fracture Mechanics Studies of Nonyielding Materials like Concrete*. Report TVBM-17, Thesis, Division of Building Materials, University of Lund, 1985.
- [41] HÄRIG, S.: *Ruhpausen und Dauerschwingfestigkeit – Einflüsse im Druckschwell- und Biegeschwellbereich von Beton*. *Beton* 5, 1977, S. 200-204.
- [42] HATT, W.K.: *Fatigue of Concrete*. *Proceedings of the Highway Research Board*, 1924, S.47.
- [43] HILLEMEIER, B.: unveröffentlicht, 2003.
- [44] HILSDORF, H. K.; KESLER, C. E.: Fatigue Strength of Concrete Under Varying Flexural Stresses. *ACI Journal*, Vol. 63, Nr.10, 1966, S. 1059 – 1076
- [45] HOLMEN, J. O.: *Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading*, Bulletin No. 79-1, Division of Concrete Structures, University of Trondheim, 1979.
- [46] HOLZAPFEL, F.: *Das Verhalten von Zementstein unter dynamischer Beanspruchung*, Dissertation, TH Aachen, 1970.
- [47] HORDIJK, D. A.: *Local Approach to Fatigue of Concrete*. Doctoral Thesis, Delft University of Technology, Delft, 1991.
- [48] HORDIJK, D. A.: *Tensile and Tensile Fatigue Behaviour of Concrete, Experiments, Modelling and Analysis*, *Heron*, Vol. 37, No.1, 1992.
- [49] HORDIJK, D. A.; REINHARDT, H.W.: *A Fracture Mechanics Approach to Fatigue of Plain Concrete*. *Fracture Mechanics of Concrete Structures FramCoS1*, Bažant, Z.P. (Hrsg.), Elsevier Applied Science, London/New York, 1992.
- [50] HSU, THOMAS T.C.: *Fatigue of Plain Concrete*. *Journal of the American Concrete Institute*, Title no. 78-27, Juli-August 1981, S. 292-305
- [51] HWAN OH, B.: *Fatigue analysis of plain concrete in flexure*, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 112, No. 2, USA, 1986, S. 273-288.
- [52] JONES, R.: *A method of studying the formation of cracks in a material subjected to stresses*. *British Journal of Applied Physics (London)*, Vol. 3, No. 7, July 1952, S. 229-232.
- [53] KELLER, T.; MENN, C.: *Dauerhaftigkeit von Stahlbetontragwerken*, Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 1991.
- [54] KLAUSEN, D.: *Festigkeit und Schädigungen von Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung*. Dissertation, TH Darmstadt, 1978.

- [55] KLAUSEN, D.; WEIGLER, H.: Betonfestigkeit bei konstanter und veränderlicher Dauerschwellbeanspruchung. *Betonwerk + Fertigteil-Technik* 45, Nr. 3, 1979, S. 158 - 163
- [56] KORDINA, L. F.: Influence of time upon strength and deformation of concrete, Final report of RILEM Symposium 1958, München, RILEM Bulletin, No. 9, 1960.
- [57] KOZAK, R.: Résistance aux efforts pulsatoires du béton et des fils employés en béton précontraint par adhérence. *Annales des travaux publics de Belgique* 4, 1965, S. 281.
- [58] KUNZE, W.; FRANK, TH.: Zum Belastungs-Verformungs-Verhalten von Beton während der laufenden Dauerschwinguntersuchung. *Materialprüfung* 20, Nr. 11, November 1978, S. 409-415.
- [59] L'HERMITE, R.: Present day ideas on concrete technology 3rd Part, The failure of concrete, *Bulletine* No. 18, RILEM, June 1954, S. 27-39.
- [60] LE CAMUS, B.: Recherches sur le comportement du béton et du armé soumis à des efforts répétés. *Compte rendu des recherches effectuées en 1945-46. Laboratoires du bâtiment et des travaux publics, Paris, S.22.*
- [61] LEEUWEN, J. VAN; SIEMES, A. J. M.: Miners rule with respect to plain concrete, Heron, Sterin Lab. Delft University of Technology, 24/1, Netherlands, 1979.
- [62] LUSCHE, M.: Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. *Schriftreihe der Zementindustrie, Heft 39, 1972.*
- [63] MEHMEL, A.: Untersuchungen über den Einfluß häufig wiederholter Druckbeanspruchungen auf Druckelastizität und Druckfestigkeit von Beton. J. Springer, Berlin, 1926.
- [64] MEHMEL, A.; KERN, E.: Elastische und plastische Stauchungen von Beton infolge Druckschwell- und Standbelastung. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 153, 1962.*
- [65] MILLS, R.E.; DAWSON, R. F.: Fatigue of Concrete, *Proceedings of the Highway Research Board, 1927, S.160.*
- [66] MINER, M.A.: Cumulative Damage in Fatigue. *Journal of Applied Mechanics, Vol. 12, No. 1, 1945.*
- [67] MÜLLER, F.P.; KEINTZEL, E.; CHARLIER, H.: Dynamische Probleme im Stahlbetonbau, Teil I, Der Baustoff Stahlbeton unter dynamischer Beanspruchung, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 342, 1983.*
- [68] MÜLLER, H.S.; KESSLER, CH.; WINKLER, H.: Ermüdungsrisssfortschritt im Beton bei Biegezugbeanspruchung. *DFG-Bericht, TU Karlsruhe, 1998.*
- [69] MURDOCK, J.W.: A Critical Review of Research on Fatigue of Plain Concrete. *Bulletin 475. Engineering Experiment Station. University of Illinois.*
- [70] NIENSTEDT, J.: Zuverlässigkeitsbeurteilung von Komponenten unter Berücksichtigung von Alterungseinflüssen. *Dissertation, Universität Innsbruck, Institut für Mechanik, 1991.*
- [71] NISHIKAWA, T.; ITO, S.; AWAJI H.: Fracture mechanics an microstructure of cement mortar. *Fracture Mechanics of Concrete Structures Proceedings FRAMCOS-3, 1998, S. 223-232.*
- [72] NORDBY, G.M.: Fatigue of Concrete – A Review of Research. *Journal of the ACI, Proceedings 55, 1958, S. 191.*
- [73] NORWEGIAN STANDARD ASSOCIATION: NS 3473, *Concrete Structures, Design Rules, Juli 1975.*
- [74] NORWEGIAN STANDARD ASSOCIATION: NS 3473/Draft, *Concrete Structures, Design Rules, Mai 1989.*
- [75] NUXOLL, F.: Simulation dynamischer Verformungs- und Ribbildungsprozesse im Betongefüge. *Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 1998.*
- [76] OH, B.H.: Cumulative Damage Theory of Concrete under Variable-Amplitude Fatigue Loadings. *ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 1, 1991.*
- [77] OH, B.H.: Fatigue-Life Distributions of Concrete for Various Stress Levels. *ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 2, 1991.*
- [78] PALMGREN, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern, *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, Band 68, Nr. 14, 1924.*
- [79] PARK, Y. J.: Fatigue of concrete under random loadings, *Journal of Structural Engineering, Vol. 116 No. 11, 1990, S. 3228-3235*
- [80] PREN 13230-4: *Bahnanwendungen - Oberbau - Gleis- und Weichenschwellen aus Beton – Teil 4: Spannbetonschwellen für Weichen und Kreuzungen, 1998.*
- [81] PROBST, E.: Untersuchungen über den Einfluß wiederholter Belastungen auf Elastizität und Festigkeit von Beton und Eisenbeton. *Bauingenieur 6, 1925, S. 931.*

- [82] RAJU, N.K.: Small Concrete Specimens Under Repeated Compressive Loads by Pulse Velocity Technique. *Journal of Materials*, Vol. 5, No. 2, 1970, S. 262.
- [83] REHM, G.; ZIMBELMANN, R.: Untersuchungen der für die Haftung zwischen Zuschlag und Zementmatrix maßgebenden Faktoren. *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton* 283, 1977.
- [84] REINHARDT, H. W.; STROEVEN, P.; DEN UIJL J. A.; KOOISTRA, T. R.; VRENCKEN, J. H. A. M.: Einfluß von Schwingbreite, Belastungshöhe und Frequenz auf die Schwingfestigkeit von Beton bei niedrigen Bruchlastwechselzahlen. *Betonwerk und Fertigteile-Technik*, Heft 9, 1978, S. 498-503.
- [85] REINHARDT, H.W. ET AL: Join investigation of concrete at high rates of loading. *Materials and Structures*, Vol. 23, Nr.135, Mai 1990, S. 213-216.
- [86] REINHARDT, H.W.; CORNELISSEN, H.A.W.; HORDIJK, D.A.: Tensile Tests and Failure Analysis of Concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 112, No. 11, 1986.
- [87] RICHART, F.E.; BRANDTZAEG, A.; BROWN, R.L.: A study of the failure of concrete under combined compressive stresses *Bulletin No. 185*, Univ. of Illinois Engineering Experimental Station, Urbana, Illinois, November 1928.
- [88] Richter, L.: Experimentelle Untersuchungen zum ermüdungsverhalten von Beton – Restfestigkeit und – steifigkeit von druckschellbeanspruchtem Normalbeton. Diplomarbeit, TU-Berlin Fakultät VI/ BAM VII.12, April 2002.
- [89] RILEM COMMITTEE 36-RDL: Long term random dynamic loading of concrete structures. *Materials and Structures*, Vol. 17, Nr. 97, 1984.
- [90] RILEM Draft-Recommendation (50-FMC): Determination of Fractur Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Test on Notched Beams. *Materials and Structures*, Vol. 18, 1985.
- [91] RINGS, K.-H.: Unbewehrter und bewehrter Beton unter häufig wiederholter Wechselbeanspruchung. Dissertation, TH Darmstadt, 1986.
- [92] ROSS, C.A. ET AL: Effect of Rate on Concrete Strength. *ACI Materials Journal*, No. 92, Vol. 1, 1995, S. 37-47.
- [93] ROSSI, P. ET AL: Effect of loading rate on the strength of concrete subjected to uniaxial tension. *Materials and Structures*, Vol. 27, Nr.169, 1994, S. 260-264.
- [94] ROSSI, P. ET AL: The dynamic behaviour of concrete: influence of free water. *Materials and Structures*, Vol. 25, Nr.153, 1992, S. 509-514.
- [95] ROSSI, P.: A physical phenomenon which can explain the mechanical behaviour of concrete under high strain rates. *Materials and Structures*, Vol. 24, Nr.144, 1991, S. 422-424.
- [96] ROTILIO, J. –D.: Contributions des actions variables aux déformations à long terme des ponts en béton, Thèse No 1870, Ecole Polytechnique de Lausanne, Suisse, 1999.
- [97] RÜSCH, H.: Physikalische Fragen der Betonprüfung. *Zement-Kalk-Gips*, Vol. 12, Nr.1, 1959, S. 1-19.
- [98] SEITO, M.; IMAI, S.: Direct Tensile Fatigue of Concrete by the Use of Friction Grips, *ACI-Journal*, Sept. Okt. 1983, S. 431-438.
- [99] SELL, R.: Investigation into the strength of concrete under sustained loads *Bulletin No. 5*, RILEM, 1959, S. 5-13.
- [100] SHAH, S.P.: *Fatigue of Concrete Structures*. ACI Publication SP-75, 1982.
- [101] SHI, X.P.; FWA, T.F.; TAN, S.A.: Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 5, 1993.
- [102] SIA DOKUMENTATION D 0133: Ermüdung von Betonbauten, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1997, S. 51.
- [103] SIEMES, A. J. M.: Fatigue of plain concrete in uniaxial compression, IABSE Report, Vol. 37, Zürich, Switzerland, 1982, S. 283-292.
- [104] SINTEF REPORT: High-Strength Concrete, SP 3 Fatigue, Report 3.2 - Fatigue of High-Strength Concrete. Sintef Structural Engineering – FCB, August 1992
- [105] SLATE, F.O.; OLSEFSKI, S.: X-Rays for Study of Internal Structure and Microcracking of concrete. *ACI Journal*, May 1963, S. 575.
- [106] SLOWIK, V.; PLIZZARI, G.A.; SAOMA, V.: Fracture of concrete under Variable amplitude loading. *ACI Materials Journal*, No. 93, 1996, S. 172-283.
- [107] SORETZ, S.: Ermüdungseinfluß im Stahlbeton. *Betonstahl in Entwicklung*, H. 24.
- [108] SPARKS, P.R.; MENZIES, J.B.: The effect of rate of loading upon the static and fatigue strength of plain concrete in compression, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 25, No. 83, 6/1973, S. 73-80.

- [109] STEFFENS, H.-D.; STEGEMANN, D., KRAPPEL, W.; CROSTAK, H.-A.: Analyse von Signalen der Schallemission. Zeitschrift für Werkstofftechnik, Heft 3, 1975, S.88.
- [110] SU, E. C.M, HSU T. T. C.: Biaxial compression Fatigue and discontinuity of concrete, ACI Materials Journal, Vol. 85, No. 3, May-June 1988, S. 178-188.
- [111] SUNDERLAND, H.; TOLOU, A.; DENARIE, E.; JOB, L.; HUET, C.: Use of the confocal microscope to study preexisting microcracks and crack growth in concrete, Fracture Mechanics of Concrete Structures Proceedings FRAMCOS-2, 1995, S. 239-248.
- [112] SWARTZ S. E., CHEN-MING J. H., KUO-KUANG H.: Crack growth and fracture in plain concrete – static versus fatigue loading. Fatigue of concrete structures, ACI special publication, SP-75, Detroit, USA, 1982.
- [113] TEPFERS, R.: Tensile Fatigue Strength of Plain Concrete, ACI-Journal, Aug. 1979, S. 919-Tepfers, R.: Tensile Fatigue Strength of Plain Concrete. ACI Journal, Vol. 76, No. 39, 1979.
- [114] TEPFERS, R.; KUTTL, T.: Fatigue strength of plain, ordinary and lightweight concrete. Journal of the American Concrete Institute, Proc., Vol. 76, Nr.5, Mai 1979, S. 635-652.
- [115] TOUMI, A.; BASCOUL, A.; TURATSINZE, A.: Microscopical observation of mode I crack propagation in concrete subjected to fatigue. Fracture Mechanics of Concrete Structures Proceedings FRAMCOS-3, 1998, S. 625-634.
- [116] UEDA, T.; SATO, Y.; KAKUTA Y.: A study on crack propagation in concrete under cyclic loading. Fracture Mechanics of Concrete Structures Proceedings FRAMCOS-3, 1998, S. 655-664.
- [117] VAN ORNUM, J.L.: Fatigue of Concrete, Transactions ASCE 58, 1907, S. 294.
- [118] VDZ: Zement, Taschenbuch 2000, 49. Ausgabe, Düsseldorf, Verlag Bau+Technik, 2000.
- [119] VOGLER, H.: Nachweis von Kapillarrissen in Straßenbaugesteinen durch Fluoreszenzmikroskopie. Straße und Autobahn, Heft 4, 1967, S. 115.
- [120] VOLLERTSEN, F.; VOGLER, S.: Werkstoffeigenschaften und Mikrostruktur. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1989.
- [121] WALRAVEN, J.; FRÉNAV, J.; PRUISSERS, A.: Influence of concrete strength and load history on the shear friction capacity of concrete members, PCI Journal, Jan-Feb, 1987, S. 66-83.
- [122] WEIGLER, H.; KERN, E.: Über die Anwendungsmöglichkeiten des Ultraschallverfahrens zur Beurteilung der Betongüte. Betonstein-Zeitung, Heft 5, 1965.
- [123] WEIGLER, H.; RINGS, K.H.: Unbewehrter und bewehrter Beton unter Wechselbelastung. Betonwerk + Fertigteil – Technik 51, Heft 11, 1985.
- [124] WESCHE, K.: Baustoffe für tragende Bauteile, Band 1: Grundlagen. 3. Auflage, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1996.
- [125] WESCHE, K.: Baustoffe für tragende Bauteile, Band 2: Beton und Mauerwerk, 3. Auflage, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1993.
- [126] WESCHE, K.; KRAUSE, K.: Der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul von Beton. Materialprüfung 14, Nr. 7, Juli 1972, S. 212-218.
- [127] WITTMANN, F.H.: Structure of concrete with respect to crack formation, Fracture Mechanics of Concrete, F.H. Wittmann, editor, Elsevier Scientific Publishing company, Amsterdam, 1983, S.43-47.
- [128] WÖHLER, A.: Achsen, deren Dimension, Form der Achsschenkel. Material Handbuch für Spezielle Eisenbahn-Technik, 2. Band, Verlag Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1870.
- [129] WÖHLER, A.: Über die Festigkeits-Versuche mit Eisen und Stahl. Zeitschrift für Bauwesen, XX, 1870, S. 73-106.
- [130] WÖHLER, A.: Über die Festigkeitsversuche mit Stahl und Stahl. Auf Anordnung des Ministeriums für Handel, Gewerbe u. öffentliche Arbeiten, Ernst und Korn, 1870.
- [131] WÖHLER, A.: Versuche zur Ermittlung der auf die Eisenbahnwagen-Achse einwirkenden Kräfte und der Widerstandsfähigkeit der Wagen-Achse. Zeitschrift für Bauwesen 8, 1958, S. 641 – 652.
- [132] YANKELEVSKY, D.Z., REINHARDT, H.W.: Uniaxial Behavior of Concrete in Cyclic Tension. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 1, 1989.
- [133] ZHANG, B.; PHILLIPS, D. V.; WU, K.: Further research on fatigue properties of plain concrete. Magazine of Concrete Research, Vol. 49, No. 180, September 1997, S. 241-252.

Anhang

ANHANG A1: BILDER	67
ANHANG A2: KORNZUSAMMENSETZUNG UND SIEBLINIE	71
ANHANG A3: FRISCHBETONERGESNISSE	72
ANHANG A4: ZEMENTFESTIGKEITEN	73
ANHANG A5: ELASTIZITÄTSMODULN UND ZYLINDERFESTIGKEITEN	74
ANHANG A6: WÜRFELPROTOKOLLE	76
ANHANG A7: MESSERGEBNISSE	77
ANHANG A8: STREUUNG DER ERGEBNISSWERTE	91

Anhang A1: Bilder

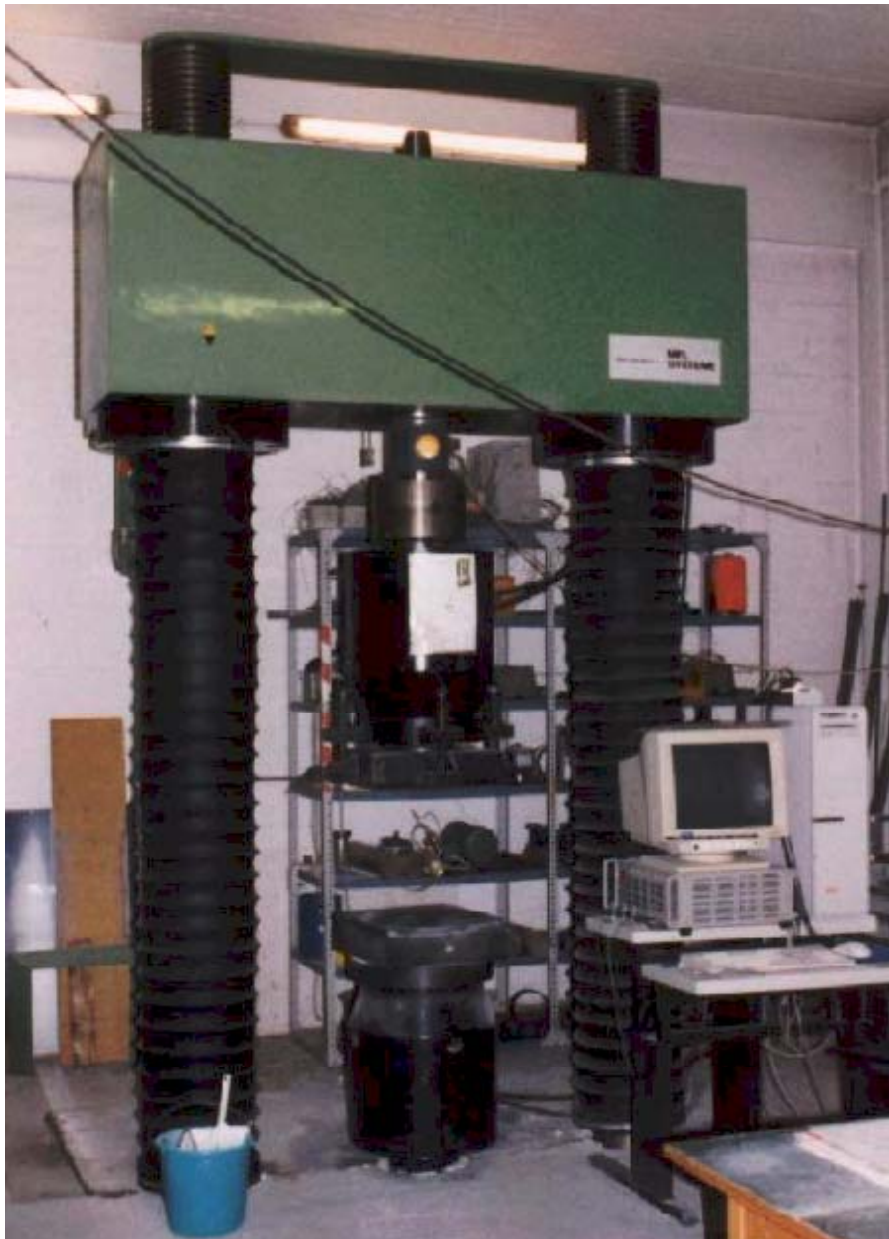


Bild 1: Prüfmaschine HUS 160



Bild 2: Prüfmaschine MTS 1 MN



Bild 3: Dauerprüfstand



Bild 4: Prüfmaschine MTS 5 MN



Bild 5: Statischer Bruchversuchsaufbau mit Ultraschall-Laufzeitmessung

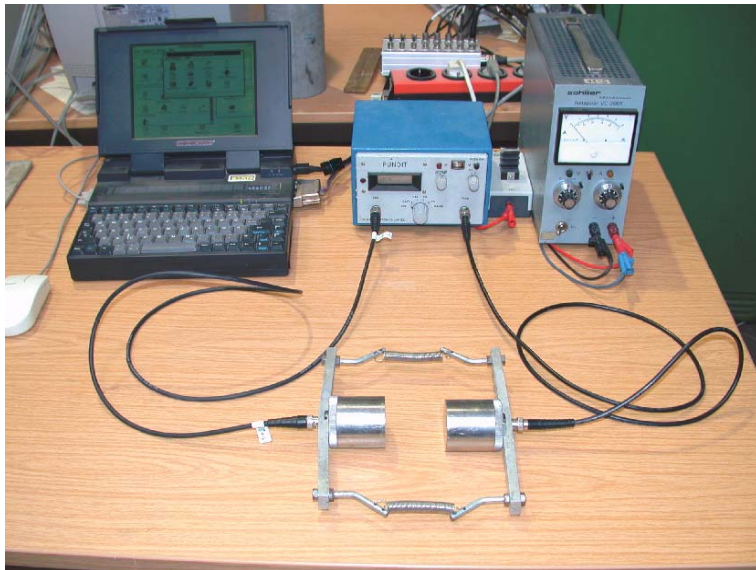


Bild 6: Ultraschall-Laufzeitmesseinrichtung

Anhang A2: Kornzusammensetzung und Sieblinie

Tabelle A2-1: Zusammensetzung der Korngruppen

Korngruppe [mm]	Durchgang in M.-% durch die Siebe (Maschen- bzw. Lochweite in mm)							Material- Herkunft
	0,25	0,5	1	2	4	8	16	
0/0,3	100	100	100	100	100	100	100	Quarz
0/0,5	67,6	99,8	100	100	100	100	100	Okrilla
0,5/1	0,3	4,3	93,6	100	100	100	100	Okrilla
1/2	0,0	0,1	1,3	82,1	100	100	100	Okrilla
2/4	0,1	0,1	0,2	0,9	94,4	100	100	Okrilla
4/8	0,1	0,3	0,6	1,0	1,8	100	100	Okrilla
8/16	0,2	0,2	0,2	0,3	1,2	8,4	100	Okrilla

Tabelle A2-2: Mischungszusammensetzung

	B25		B45		B95		B25jap		B25rec	
	[%]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]
Zuschlag	100	1816	100	1763	100	1735	100	1751	100	1572
0/0,3	6	110	2	36	5	86,8	0	0	5	74
0/0,5	12	216	10	176	14	242,9	16	279	12	182
0,5/1	11	198	5	88	10	173,5	16	279	7	109
1/2	12	216	12	211	9	156,2	14	244	16	254
2/4	11	198	16	281	7	121,4	22	384	19	302 ⁴⁾
4/8	22	404	23	409	25	433,8	32	565		
8/16	26	474	32	562	30	520,5	---	---	18	286 ⁴⁾
16/32	---	---	---	---	---	---	---	---	23	366 ⁴⁾
Sieblinie	B 16		B 16		B 16		A/B 8		B 32	
Körnungsziffer	3,71		4,19		3,82		3,30		4,18	
Zement	300 ¹⁾		400 ¹⁾		500 ²⁾		330 ¹⁾		300 ¹⁾	
Silicastaub	---		---		50		---		---	
Wasser	190		180		124		206		190	
Fließmittel³⁾	---		---		25		1,88		---	

1) Schwenk CEM I 32,5 R

2) Wittekind CEM I 42,5 R

3) Woerment FM 21

4) Recyclingmaterial (W)

Anhang A3: Frischbetonergebnisse

Tabelle A3-1: Auflistung der Frischbetonergebnisse der Mischungen „ALT“

Mischung	Festigkeits- klasse	Ausbreit- maß [cm]	Masse LP-Topf [g]	Rohdichte LP-Topf [g/cm ³]	LP- gehalt [%]	Frischbeton Masse - Würfel			Rohdichte Würfel- Mw [g/cm ³]
						1 [g]	2 [g]	3 [g]	
Alt 01	B25	55/55	18900	2,36	0,9	7869	7966	7869	2,34
Alt 02	B25	52/53	18738	2,34	1,3	7900	7867	8008	2,35
Alt 03	B25	46/46	18861	2,36	1,5	7875	7908	7925	2,34
Alt 04	B45	-	-	-	-	-	-	-	-
Alt 05	B95	-	-	-	-	-	-	-	-
Alt 06 jap	B25*	50/50	18593	2,32	1,7	7709	7805	7759	2,3
Alt 07	B95	67/66	19544	2,44	1,2	8245	8155	8128	2,42
Alt 08	B45	42/44	19051	2,38	1,4	8002	7952	7942	2,36
Alt 09	B25	49/50	18806	2,35	1,5	7848	7907	7864	2,33
Alt10	B95	70/72	19666	2,46	0,7	8258	8180	8288	2,44
Alt11	B95	69/68	19660	2,46	1,2	8142	8182	8160	2,42
Alt12	B25	43/42	18743	2,34	1,8	7821	7900	7857	2,33
Alt13	B45	38/36	19062	2,38	1,5	7987	7890	7910	2,35
Alt14	B25	46/43	18850	2,36	1,1	7892	7845	7792	2,32
Alt15	B45	38/35	18952	2,37	1,8	7974	7917	7958	2,36
Alt16 rec	B25**	36/38	17284	2,16	4,8	7238	7260	7347	2,16
Alt17	B95	75/75	19579	2,45	0,9	8245	8218	8221	2,44
Alt18	B45	39/37	19057	2,38	1,5	7983	8032	8013	2,37
Alt19	B45	38/40	19069	2,38	1,4	7996	7947	7999	2,36
Alt20	B95	68/70	19585	2,45	0,8	8247	8254	8240	2,44
Alt21	B25	50/51	18833	2,35	0,9	7946	7934	7906	2,35
Alt22 rec	B25**	44/46	17075	2,13	5,7	7260	7279	7232	2,15
Alt23	B25	48/48	18880	2,36	1,1	7922	7884	7898	2,34
Alt24	B25	48/49	18939	2,37	1,0	7932	7922	7862	2,34
Alt25	B25	48/50	18873	2,36	1,0	7903	7903	7967	2,35
Alt26	B25	49/51	18848	2,36	1,1	7876	7931	7915	2,34
Alt27	B25	45/48	18987	2,37	1,0	7921	7962	7907	2,35
Alt28	B25	46/48	18871	2,36	1,1	7902	7894	7914	2,34
Alt29	B45	42/46	19138	2,39	1,1	8046	8026	8062	2,38
Alt30	B45	41/38	19057	2,38	1,4	7932	7979	7988	2,36

Tabelle A3-2: : Auflistung der Frischbetonergebnisse der Mischungen „S“

Mischung	Festigkeits- klasse	Ausbreit- maß [cm]	Masse LP-Topf [g]	Rohdichte LP-Topf [g/cm ³]	LP- gehalt [%]	Frischbeton Masse - Würfel			Rohdichte Würfel- Mw [g/cm ³]
						1 [g]	2 [g]	3 [g]	
S 4	B45	-	-	-	-	-	-	-	-
S 5	B25	-	-	-	-	-	-	-	-
S 6	B95	-	-	-	-	-	-	-	-
S 7	B25	44/46	18836	-	-	7894	7898	7911	-
S 8	B45	40/38	19069	-	1,4	8041	8035	7996	-

* Mischung mit achter Größtkorn

** Mischung mit Recyclingmaterial

Anhang A4: Zementfestigkeiten

Tabelle A4-3: Zementfestigkeiten, Probekörperabmessungen 160 mm x 40 mm x 40 mm

		<i>Alt 2-B 25</i>			<i>Alt 11-B 95</i>			<i>Alt 14-B 25</i>			<i>Alt 16-B 25</i>			<i>Alt 17-B 95</i>		
Herstellung		14.01.2002			15.01.2002			15.01.2002			16.01.2002			14.01.2002		
Alter [d]		2	7	28	2	2	7	28	7	28	2	7	28	2	7	28
Biegezugfestigkeit [MPa]	1	3,8	6,2	7,3	3,3	3,5	5,6	7,3	6,4	8,8	4,5	5,9	6,1	3,9	7,4	7,3
	2	4,1	6,6	8,6	3,4	3,1	5,9	7,8	6,2	8,0	4,4	6,1	8,1	4,3	6,6	7,7
	3	4,0	6,2	7,4	3,7	3,0	6,0	8,4	7,0	8,0	3,9	6,4	8,2	4,6	6,9	7,2
	Mw	4,0	6,3	7,8	3,5	3,2	5,8	7,8	6,5	8,3	4,3	6,1	7,5	4,3	7,0	7,4
Druckfestigkeit [MPa]	1a	19,4	36,8	50,8	20,8	19,0	41,1	55,7	42,7	59,6	23,7	37,4	49,1	22,3	37,9	46,9
	1b	19,6	37,6	51,9	20,1	19,8	41,4	54,3	43,1	57,9	24,1	37,0	49,0	21,6	39,8	47,6
	2a	19,4	35,9	49,1	20,8	18,9	40,5	55,5	42,8	57,7	22,9	35,0	48,8	22,4	38,6	48,4
	2b	19,4	37,1	50,3	20,3	19,6	40,6	55,6	43,0	57,1	22,9	36,9	48,9	21,8	39,2	47,8
	3a	20,1	37,8	48,7	21,2	19,6	40,8	57,7	43,4	57,9	22,6	38,3	48,2	22,7	38,9	47,2
	3b	20,1	36,6	48,4	21,3	20,1	41,4	55,4	43,9	59,4	22,6	35,6	49,9	22,5	38,8	48,4
	Mw	19,7	37,0	49,9	20,8	19,5	41,0	55,7	43,2	58,3	23,1	36,7	49,0	22,2	38,9	47,7
Rohdichte [MPa]	1	2,28	2,28	2,29	2,31	2,28	2,31	2,31	2,32	2,32	2,29	2,27	2,30	2,27	2,29	2,30
	2	2,28	2,27	2,29	2,31	2,28	2,30	2,29	2,32	2,32	2,29	2,26	2,30	2,28	2,29	2,31
	3	2,28	2,27	2,29	2,31	2,29	2,30	2,30	2,30	2,32	2,28	2,26	2,30	2,28	2,30	2,30
	Mw	2,28	2,27	2,29	2,31	2,28	2,30	2,30	2,31	2,32	2,29	2,26	2,30	2,28	2,29	2,30

Tabelle A4-4: Zementfestigkeiten, Probekörperabmessungen 160 mm x 40 mm x 40 mm

		<i>Alt 20-B 95</i>			<i>Alt 21-B 25</i>			<i>Alt 23-B 25</i>			<i>Alt 28-B 25</i>			<i>Alt 30-B 45</i>		
Herstellung		16.01.2002			16.01.2002			21.01.2002			22.01.2002			22.01.2002		
Alter [d]		2	7	28	2	2	7	28	7	28	2	7	28	2	7	28
Biegezugfestigkeit [MPa]	1	3,3	6,0	7,4	3,8	6,3	7,2	4,4	6,2	8,2	3,9	6,3	7,2	3,3	5,5	7,1
	2	3,3	5,8	8,6	3,4	5,6	7,1	4,7	6,7	8,2	4,0	6,3	7,7	2,9	5,6	8,1
	3	3,3	6,2	8,3	3,4	6,4	7,7	4,2	6,4	8,2	4,1	9,9	7,8	3,2	5,8	7,9
	Mw	3,3	6,0	8,1	3,5	6,1	7,3	4,4	6,4	8,2	4,0	7,5	7,6	3,1	5,6	7,7
Druckfestigkeit [MPa]	1a	17,2	39,9	54,1	18,3	35,0	44,3	21,6	37,9	48,2	24,0	42,3	48,8	20,8	37,7	48,6
	1b	17,3	37,6	55,8	17,9	34,8	44,1	21,1	38,5	49,2	23,6	40,4	49,2	20,0	33,3	49,7
	2a	17,5	39,7	55,4	17,9	34,5	45,6	21,1	38,1	47,9	24,4	40,8	49,6	19,8	35,7	52,4
	2b	17,5	38,6	54,4	17,7	34,1	45,6	21,7	37,0	49,2	24,6	39,8	48,9	19,2	36,3	49,6
	3a	17,4	38,4	55,1	17,8	36,0	46,4	21,6	38,3	47,4	24,0	40,3	49,6	20,0	38,2	47,2
	3b	17,5	40,1	54,6	17,9	35,3	45,7	21,7	38,2	49,5	23,7	39,5	50,2	19,7	37,5	48,6
	Mw	17,4	39,1	54,9	17,9	35,0	45,3	21,5	38,0	48,6	24,1	40,5	49,4	19,9	36,5	49,4
Rohdichte [MPa]	1	2,28	2,30	2,29	2,31	2,30	2,31	2,28	2,31	2,34	2,28	2,30	2,30	2,16	2,31	2,27
	2	2,28	2,31	2,28	2,30	2,30	2,32	2,27	2,32	2,33	2,30	2,29	2,29	2,30	2,31	2,27
	3	2,29	2,30	2,28	2,29	2,31	2,32	2,28	2,32	2,33	2,29	2,29	2,30	2,30	2,34	2,24
	Mw	2,28	2,30	2,28	2,30	2,30	2,32	2,28	2,32	2,33	2,29	2,29	2,30	2,25	2,32	2,26

Anhang A5: Elastizitätsmoduln und Zylinderfestigkeiten

Tabelle A5-5: Zusammenstellung der Elastizitätsmodul und Zylinderfestigkeiten der Serien Alt06 bis Alt10

Mischung		Alt 06	Alt 07	Alt 08	Alt 09	Alt 10
Betongüte		B25jap*	B95	B45	B25	B95
Lagerungsart		Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum
Druckfestigkeit Zylinder 28d [N/mm ²]	1	---	---	---	---	---
	2	---	---	---	---	---
	Mw	---	---	---	---	---
Stat. E-Modul Zylinder 28d [MPa]	1	27.164	40.602	35.874	32.391	40.246
	2	28.226	43.966	33.998	30.154	42.677
	Mw	27.695	42.284	34.936	31.273	41.462
Dyn. E-Modul Zylinder 28d [MPa]	1	36.785	49.967	42.331	38.386	48.108
	2	36.573	50.682	42.254	37.945	49.676
	Mw	36.679	50.325	42.293	38.166	48.892

Tabelle A5-6: Zusammenstellung der Elastizitätsmodul und Zylinderfestigkeiten der Serien Alt11 bis Alt15

Mischung		Alt 11	Alt 12	Alt 13	Alt 14	Alt 15
Betongüte		B95	B25	B45	B25	B45
Lagerungsart		Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum
Druckfestigkeit Zylinder 28d [N/mm ²]	1	---	30,1	46,0	30,3	42,6
	2	---	31,1	45,7	29,7	46,5
	Mw	---	30,6	45,9	30,0	44,6
Stat. E-Modul Zylinder 28d [MPa]	1	27.164	29.282	31.193	27.753	32.897
	2	28.226	30.271	33.546	26.960	30.912
	Mw	27.695	29.777	32.370	27.357	31.905
dyn. E-Modul Zylinder 28d [MPa]	1	49.241	36.583	41.188	37.197	39.939
	2	49.599	37.492	41.167	35.582	40.902
	Mw	49.420	37.038	41.178	36.390	40.421

Tabelle A5-7: Zusammenstellung der Elastizitätsmodul und Zylinderfestigkeiten der Serien Alt16 bis Alt20

Mischung		Alt 16	Alt 17	Alt 18	Alt 19	Alt 20
Betongüte		B25rec**	B95	B45	B45	B95
Lagerungsart		Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum
Druckfestigkeit Zylinder 28d [N/mm ²]	1	33,0	92,1	46,0	44,4	106,1
	2	34,3	92,9	45,9	45,2	101,9
	Mw	33,7	92,5	46,0	44,8	104,0
Stat. E-Modul Zylinder 28d [MPa]	1	22.251	41.152	32.712	36.137	43.568
	2	21.591	41.902	29.234	32.287	42.308
	Mw	21.921	41.527	30.973	34.212	42.938
Dyn. E-Modul Zylinder 28d [MPa]	1	27.058	50.083	41.292	42.303	52.006
	2	27.397	49.786	41.649	40.558	50.261
	Mw	27.228	49.935	41.471	41.431	51.134

Tabelle A5-8: Zusammenstellung der Elastizitätsmoduln und Zylinderfestigkeiten der Serien Alt21 bis Alt25

Mischung		Alt 21	Alt 22	Alt 23	Alt 24	Alt 25
Betongüte		B25	B25rec**	B25	B25	B25
Lagerungsart		Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum
Druckfestigkeit Zylinder 28d [N/mm ²]	1	23,5	28,3	30,7	34,2	33,4
	2	---	29,4	31,7	34,4	35,0
	Mw	23,5	28,9	31,2	34,3	34,2
Stat. E-Modul Zylinder 28d [MPa]	1	22.242	24.215	31.774	34.793	34.250
	2	---	23.287	31.035	33.222	32.469
	Mw	22.242	23.751	31.405	34.008	33.360
Dyn. E-Modul Zylinder 28d [MPa]	1	34.335	26.903	38.147	38.794	38.278
	2	37.295	26.959	36.943	37.993	37.089
	Mw	35.815	26.931	37.545	38.394	37.684

Tabelle A5-9: Zusammenstellung der Elastizitätsmoduln und Zylinderfestigkeiten der Serien Alt26 bis Alt30

Mischung		Alt 26	Alt 27	Alt 28	Alt 29	Alt 30
Betongüte		B25	B25	B25	B45	B45
Lagerungsart		Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum
Druckfestigkeit Zylinder 28d [N/mm ²]	1	36,1	35,2	34,1	50,3	49,6
	2	35,6	32,8	35,2	53,2	52,5
	Mw	35,9	34,0	34,7	51,8	51,1
Stat. E-Modul Zylinder 28d [MPa]	1	35.076	31.614	32.370	39.467	33.685
	2	33.880	33.035	33.131	38.378	32.122
	Mw	34.478	32.325	32.751	38.923	32.904
Dyn. E-Modul Zylinder 28d [MPa]	1	38.670	37.824	37.410	41.940	41.169
	2	38.939	37.755	38.762	41.669	41.825
	Mw	38.805	37.790	38.086	41.805	41.497

Tabelle A5-10: Zusammenstellung der Elastizitätsmoduln und Zylinderfestigkeiten der Serie „S“

Mischung		S 4	S 5	S 6	S 7	S 8
Betongüte		B45	B25	B25	B25	B45
Lagerungsart		Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum	Klimaraum
Druckfestigkeit Zylinder 28d [N/mm ²]	1	58,7	39,2	---	27,2	44,4
	2	59,4	36,4	---	28,3	43,3
	Mw	59,1	37,8	---	27,8	43,9
Stat. E-Modul Zylinder 28d [MPa]	1	---	31.322	42.208	27.759	33.859
	2	---	---	---	29.416	33.218
	Mw	---	31.322	42.208	28.588	33.539
Dyn. E-Modul Zylinder 28d [MPa]	1	---	---	---	40.011	44.654
	2	---	---	---	40.193	43.783
	Mw	---	---	---	40.102	44.219

* Mischung mit achter Größtkorn

** Mischung mit Recyclingmaterial

Anhang A6: Würfelprotokolle

Tabelle A6-11: Zusammenstellung der Ergebnisse der Würfelprüfungen am 28.Tag der Serien Alt01 bis Alt10

Mischung	Alt 01	Alt 02	Alt 03	Alt 04	Alt 05	Alt 06	Alt 07	Alt 08	Alt 09	Alt 10	
Festigkeitsklasse	B 25	B 25	B 25	B 45	B 95	B 25jap	B 95	B 45	B 25	B 95	
Druckfestigkeit Würfel [MPa]	1	33,1	38,5	40,5	58,7	109,6	33,6	109,1	59,5	41,4	106,4
	2	33,4	37,9	39,3	59,2	111,2	33,9	107,7	60,8	40,5	101,5
	3	32,6	38,9	40,8	58,3	113,7	35,2	112,6	60,1	39,9	104,6
	Mw	33,0	38,5	40,2	58,7	111,5	34,2	109,8	60,1	40,6	104,2
Rohdichte Würfel [g/cm ³]	1	2,32	2,32	2,32	2,36	2,41	2,29	2,43	2,37	2,34	2,43
	2	2,34	2,31	2,31	2,36	2,41	2,29	2,41	2,36	2,32	2,41
	3	2,31	2,30	2,32	2,36	2,43	2,29	2,43	2,35	2,32	2,44
	Mw	2,32	2,31	2,32	2,36	2,42	2,29	2,42	2,36	2,33	2,43

Tabelle A6-12: Zusammenstellung der Ergebnisse der Würfelprüfungen am 28.Tag der Serien Alt21 bis Alt20

Mischung	Alt 11	Alt 12	Alt 13	Alt 14	Alt 15	Alt 16	Alt 17	Alt 18	Alt 19	Alt 20	
Festigkeitsklasse	B 95	B 25	B 45	B 25	B 45	B 25rec	B 95	B 45	B 45	B 95	
Druckfestigkeit Würfel [MPa]	1	101,7	36,3	54,3	38,5	53,7	38,4	107,1	54,7	54,7	113,2
	2	102,6	37,9	52,3	36,3	49,9	38,1	105,8	54,4	54,7	106,8
	3	99,7	36,8	52,6	34,6	51,8	39,6	102,5	54,1	53,9	108,2
	Mw	101,3	37,0	53,1	36,5	51,8	38,7	105,1	54,4	54,4	109,4
Rohdichte Würfel [g/cm ³]	1	2,43	2,30	2,34	2,32	2,35	2,12	2,44	2,35	2,35	2,45
	2	2,43	2,31	2,34	2,30	2,35	2,12	2,44	2,36	2,35	2,45
	3	2,43	2,30	2,34	2,29	2,36	2,12	2,44	2,36	2,35	2,45
	Mw	2,43	2,30	2,34	2,30	2,35	2,12	2,44	2,36	2,35	2,45

Tabelle A6-13: Zusammenstellung der Ergebnisse der Würfelprüfungen am 28.Tag der Serien Alt21 bis Alt30

Mischung	Alt 21	Alt 22	Alt 23	Alt 24	Alt 25	Alt 26	Alt 27	Alt 28	Alt 29	Alt 30	
Festigkeitsklasse	B 25	B 25rec	B 25	B 25	B 25	B 25	B 25	B 25	B 25	B 45	
Druckfestigkeit Würfel [MPa]	1	32,7	32,6	35,6	41,9	39,7	41,0	42,4	41,7	61,5	60,7
	2	32,7	34,5	35,1	41,3	41,4	41,3	39,3	42,3	59,2	60,2
	3	32,7	34,1	35,1	40,6	43,3	40,5	40,3	42,8	61,6	59,8
	Mw	32,7	33,7	35,3	41,3	41,4	40,9	40,7	42,2	60,8	60,2
Rohdichte Würfel [g/cm ³]	1	2,32	2,12	2,32	2,33	2,33	2,32	2,33	2,32	2,36	2,36
	2	2,31	2,13	2,31	2,33	2,33	2,33	2,34	2,34	2,36	2,36
	3	2,33	2,11	2,33	2,32	2,34	2,34	2,33	2,34	2,37	2,36
	Mw	2,32	2,12	2,32	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,37

Tabelle A6-14: Zusammenstellung der Ergebnisse der Würfelprüfungen am 28.Tag der Serie „S“

Mischung	S 04	S 05	S 06	S 07	S 08	
Festigkeitsklasse	B 45	B 25	B 95	B 25	B 45	
Druckfestigkeit Würfel [MPa]	1	59,0	38,2	109,2	36,2	55,5
	2	58,7	37,8	112,7	37,3	53,4
	3	59,6	37,6	113,9	35,7	53,2
	Mw	59,1	37,9	111,9	36,4	54,0
Rohdichte Würfel [g/cm ³]	1	2,33	2,32	2,42	2,31	2,37
	2	2,33	2,31	2,42	2,32	2,37
	3	2,35	2,31	2,42	2,32	2,36
	Mw	2,34	2,31	2,42	2,32	2,36

Anhang A7: Messergebnisse

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [/]	N [/]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent,0}$ [MPa]	D_0 bzw. E_{stat} [MPa]	T_N [d]	\dot{D} [MPa·s ⁻¹]	$\frac{D_N}{D_0}$ [/]	$\frac{D_{n,w}}{D_0}$ [/]	ϵ_{ges} [%]	$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$ [MPa]	Bemerkung
Alt01_B25_01	---	237,1	---	---	36.646	34.795	30.318	---	---	---	---	---	---	Stat (353d)
Alt01_B25_02	---	242,6	---	---	38.576	34.153	30.567	---	---	---	---	---	---	Stat (353d)
Alt01_B25_03	---	223,4	---	---	38.018	33.856	29.342	---	---	---	---	---	---	Stat (353d)
Alt01_B25_04	---	253,8	---	---	37.517	34.381	29.793	---	---	---	---	---	---	Stat (353d)
Alt01_B25_05	---	242,1	---	---	36.172	33.903	30.472	---	---	---	---	---	---	Stat (353d)
Alt01_B25_06	---	265,3	---	---	40.481	36.645	32.547	---	---	---	---	---	---	Stat (353d)
Alt01_B25_07	---	236,5	---	---	37.521	34.579	31.093	---	---	---	---	---	---	Stat (353d)
Alt01_B25_08	---	248,9	---	---	36.628	33.906	29.601	---	---	---	---	---	---	Stat (353d)
Alt01_B25_09	---	241,3	---	---	36.037	33.389	29.985	---	---	---	---	---	---	Stat (353d)
Alt01_B25_25	---	239,8	---	---	38.368	34.845	30.319	---	---	---	---	---	---	Stat (353d)
Alt02_B25_01	---	249,2	---	---	38.253	34.234	---	---	---	---	---	---	---	Stat
Alt02_B25_12	20	167	0,65	1.789.000	39.529	34.885	30.278	1,0350	0,003	0,470	0,619	3,02	9,7	
Alt02_B25_13	20	167	0,65	1.822.500	38.893	33.905	28.740	0,9800	0,003	0,530	0,633	2,12	11,2	
Alt02_B25_14	20	187	0,73	42.500	37.953	34.191	28.777	0,0246	0,133	0,560	0,796	1,80	22,6	
Alt02_B25_15	20	187	0,73	67.500	40.726	33.748	28.543	0,0390	0,094	0,548	0,810	2,13	17,2	
Alt02_B25_16	20	177	0,69	605.000	40.021	34.535	30.311	0,3500	0,012	0,438	0,638	2,83	15,9	
Alt02_B25_17	20	147	0,57	19.575.000	39.441	34.381	29.595	11,3200	0,001	0,421	0,595	3,28	5,7	
Alt02_B25_18	5	167	0,65	2.735.000	39.227	33.964	28.972	6,3300	0,002	0,489	0,600	2,81	12,5	
Alt02_B25_19	10	167	0,65	1.975.000	39.707	34.831	29.873	2,2800	0,003	0,464	0,614	0,00	12,0	
Alt02_B25_20	10	167	0,65	332.500	39.293	34.860	30.188	0,3850	0,018	0,495	0,642	2,11	23,2	
Alt02_B25_21	5	167	0,65	5.677.500	39.070	34.818	29.100	13,1480	0,001	0,540	0,610	2,66	3,2	
Alt02_B25_22	20	167	0,65	1.422.500	38.767	35.308	30.247	0,8230	0,004	0,520	0,651	2,01	---	Haltezeit
Alt02_B25_23	20	167	0,65	4.235.000	38.584	34.669	29.068	2,4500	0,001	0,453	0,634	2,72	---	Haltezeit
Alt02_B25_24	20	167	0,65	2.157.500	37.336	33.711	29.565	2,4971	0,003	0,540	0,641	2,37	---	Haltezeit
Alt02_B25_25	20	187	0,73	92.500	36.714	33.465	28.411	0,0535	0,064	0,524	0,703	2,37	19,7	
Alt02_B25_26	10	167	0,65	2.972.500	37.478	34.221	29.620	3,4404	0,002	0,448	0,592	2,72	20,3	
Alt02_B25_27	10	187	0,73	177.500	36.180	34.409	29.360	0,2054	0,038	0,478	0,684	2,41	9,9	
Alt02_B25_28	10	187	0,73	95.000	36.775	35.177	30.158	0,1099	0,066	0,509	0,677	2,32	26,4	
Alt02_B25_29	---	265,4	---	---	36295	34.515	30.397	---	---	---	---	---	---	Stat (329d)
Alt03_B25_01	---	---	---	---	43.461	38.034	---	---	---	---	---	---	---	
Alt03_B25_02	---	---	---	---	41.586	37.454	---	---	---	---	---	---	---	
Alt03_B25_03	---	---	---	---	42.745	37.700	---	---	---	---	---	---	---	
Alt03_B25_04	---	---	---	---	42.129	37.181	---	---	---	---	---	---	---	
Alt03_B25_05	---	---	---	---	42.613	36.383	---	---	---	---	---	---	---	Volumenänderung
Alt03_B25_06	10	187	0,64	1.372.500	40.723	36.876	32.104	1,5885	0,004	0,370	0,605	2,96	---	
Alt03_B25_07	10	187	0,64	1.250.000	41.162	37.471	33.171	1,4467	0,004	0,558	0,624	3,03	---	
Alt03_B25_09	5	187	0,64	2.537.500	41.755	38.215	34.399	5,8738	0,003	0,571	0,589	2,65	---	
Alt03_B25_10	---	291,5	---	---	41.747	37.341	---	---	---	---	---	---	---	Stat weg
Alt03_B25_11	---	286,2	---	---	40.537	38.016	---	---	---	---	---	---	---	Stat weg
Alt03_B25_12	---	270,6	---	---	40.095	37.307	---	---	---	---	---	---	---	Stat weg
Alt03_B25_13	---	297,9	---	---	42.104	40.522	---	---	---	---	---	---	---	Stat weg
Alt03_B25_14	---	306,4	---	---	41.213	39.459	---	---	---	---	---	---	---	Stat weg
Alt03_B25_15	---	288,9	---	---	39.545	36.684	22.403	---	---	---	---	---	---	Stat weg, Vor
Alt03_B25_16	---	280,3	---	---	40.255	37.304	---	---	---	---	---	---	---	Stat weg, Vor
Alt03_B25_17	---	299,5	---	---	41.282	37.871	---	---	---	---	---	---	---	Stat weg, Vor
Alt03_B25_18	---	294,8	---	---	40.747	39.061	---	---	---	---	---	---	---	Stat weg, Vor
Alt03_B25_20	---	273,3	---	---	40.196	36.706	---	---	---	---	---	---	---	Stat weg, Vor
Alt03_B25_21	---	221,3	---	---	39.762	37.634	---	---	---	---	---	---	---	Stat (271d)
Alt03_B25_22	---	271,4	---	---	40.722	39.064	---	---	---	---	---	---	---	Stat (271d)
Alt03_B25_23	---	300,2	---	---	40.900	37.381	---	---	---	---	---	---	---	Stat (271d)
Alt03_B25_24	---	287,6	---	---	39.742	36.135	---	---	---	---	---	---	---	Stat (271d)
Alt03_B25_27	---	338,3	---	---	40.846	39.536	---	---	---	---	---	---	---	Stat
Alt03_B25_29	10	187	0,64	110.000	40.202	37.603	22.300	---	0,034	---	---	---	---	Stat weg, Vor
Alt03_B25_30	10	187	0,64	390.000	40.139	35.884	21.500	---	0,010	---	---	---	---	
Alt03_B25_31	---	293,0	---	---	39.940	37.418	31.680	---	---	---	---	---	---	Stat (211d)

Anhang

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [$\bar{}$]	N [$\bar{}$]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent,0}$ [MPa]	D_0 bzw. E_{stat} [MPa]	T_N [d]	\dot{D} [MPa·s ⁻¹]	$\frac{D_N}{D_0}$ [$\bar{}$]	$\frac{D_{n,w}}{D_0}$ [$\bar{}$]	ϵ_{ges} [‰]	$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$ [MPa]	Bemerkung
Alt04_B45_01	---	---	---	---	46.581	42.134	---	---	---	---	---	---	---	Stat
Alt04_B45_02	20	336	0,75	145.000	46.847	43.852	36.728	0,0839	0,021	0,752	0,787	1,74	---	
Alt04_B45_03	---	417,0	---	---	46.401	41.543	---	---	---	---	---	2,37	---	Stat
Alt04_B45_04	10	300	0,67	65.000	46.019	43.082	35.077	0,0750	0,113	0,619	0,793	2,29	13,9	
Alt04_B45_05	10	264	0,59	1.035.000	45.747	41.089	34.746	1,1980	0,007	0,530	0,712	2,79	8,5	
Alt04_B45_06	10	264	0,59	1.302.500	45.513	42.656	34.619	1,5080	0,004	0,601	0,734	2,80	8,5	
Alt04_B45_07	10	300	0,67	95.000	46.032	43.378	35.000	0,1099	0,059	0,635	0,791	2,57	8,3	
Alt04_B45_08	10	300	0,67	85.000	46.327	44.134	34.890	0,0984	0,070	0,639	0,797	2,56	11,7	
Alt04_B45_09	10	336	0,75	20.000	46.558	42.581	35.300	0,2601	0,280	0,763	0,844	1,94	11,8	
Alt04_B45_10	10	336	0,75	7.500	45.872	43.018	35.510	0,0086	0,689	0,729	0,808	1,87	26,9	
Alt04_B45_11	10	336	0,75	10.000	45.550	42.674	35.402	0,0115	0,626	0,744	0,832	2,00	20,6	
Alt04_B45_12	5	336	0,75	5.000	46.189	43.235	35.850	0,0115	0,882	0,778	0,822	2,02	23,8	
Alt04_B45_13	10	336	0,75	10.000	45.157	41.704	34.922	0,0115	0,515	0,777	0,856	1,83	12,3	
Alt04_B45_14	5	336	0,75	7.500	45.442	43.313	36.843	0,0173	0,885	0,782	0,828	1,93	22,6	
Alt04_B45_15	10	264	0,59	1.467.500	45.444	42.726	37.050	3,3969	0,001	0,808	0,815	1,48	3,5	
Alt04_B45_16	1	336	0,75	1.400	44.573	41.324	34.898	0,0162	2,490	0,779	0,832	2,26	37,3	
Alt04_B45_17	1	336	0,75	7.500	45.024	42.709	38.951	0,0868	1,612	0,670	0,859	1,72	27,0	
Alt04_B45_18	0,1	336	0,75	2.400	45.726	42.893	37.119	0,2777	2,697	0,765	0,888	2,28	31,3	
Alt04_B45_19	5	336	0,75	7.500	45.657	42.078	36.380	0,0173	0,471	0,806	0,858	1,81	20,1	
Alt04_B45_20	---	450,1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	Stat
Alt04_B45_22	1	336	0,75	22.500	44.905	43.219	38.078	0,2604	0,387	0,749	0,839	1,98	25,6	
Alt04_B45_23	1	336	0,75	10.000	43.868	42.466	36.095	0,1157	0,410	0,750	0,792	2,17	24,8	
Alt04_B45_24	1	264	0,59	1.292.500	45.691	42.489	36.160	14,9590	0,005	0,405	0,651	3,49	15,4	
Alt04_B45_25	0,1	336	0,75	5.000	45.104	42.051	35.650	0,8280	1,127	0,747	0,794	2,28	32,0	
Alt04_B45_26	0,1	336	0,75	5.000	45.079	41.797	36.680	0,5787	1,160	0,854	0,805	2,49	32,7	
Alt04_B45_27	---	430,2	---	---	44.734	42.247	---	---	---	---	---	2,36	---	Stat (203d)
Alt04_B45_28	10	177	0,39	---	46.048	42.897	---	---	---	---	---	---	---	
Alt04_B45_29	---	---	---	---	45.046	43.102	---	---	---	---	---	---	---	
Alt04_B45_30	0,01	336	0,75	4999	45.214	43.599	36.739	2,8935	1,160	0,838	0,847	2,14	31,8	
Alt04_B45_31	---	---	---	---	44.578	42.614	---	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_01	---	808,6	---	---	50.568	51.132	---	---	---	---	---	2,52	---	Stat
Alt05_B95_02	10	560	0,72	37.500	50.567	49.949	40.670	0,0434	0,180	0,768	0,884	2,14	3,5	
Alt05_B95_03	10	560	0,72	42.500	52.367	49.279	41.980	0,0492	0,124	0,811	0,896	1,88	4,0	
Alt05_B95_04	10	484	0,50	10.585.000	51.934	49.444	42.285	12,2510	0,001	0,736	0,780	3,72	2,6	
Alt05_B95_05	5	560	0,72	37.500	52.390	49.027	42.400	0,0868	0,154	0,790	0,866	2,04	9,5	
Alt05_B95_06	10	634	0,76	17.500	51.067	49.362	42.147	0,0200	0,297	0,612	0,897	2,41	2,4	
Alt05_B95_07	10	560	0,72	45.000	50.347	49.650	42.071	0,0550	0,114	0,800	0,883	2,99	8,1	
Alt05_B95_08	10	634	0,76	17.500	51.931	51.359	42.423	0,0200	0,204	0,807	0,843	2,22	11,5	
Alt05_B95_09	5	634	0,78	5.000	49.464	49.987	40.000	0,0115	0,648	0,859	0,895	2,31	15,7	
Alt05_B95_10	10	708	0,88	600	49.870	48.409	41.565	0,0009	5,512	0,869	0,943	2,56	13,6	
Alt05_B95_15	10	634	0,76	32.500	51.317	50.435	42.803	0,0376	0,160	0,808	0,877	2,31	6,7	
Alt05_B95_16	1	703	0,84	---	50.350	49.262	---	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_17	1	560	0,72	---	49.888	50.812	---	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_18	0,5	703	0,84	---	50.327	50.352	---	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_19	10	703	0,84	1.900	51.392	49.507	40.427	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_20	1	703	0,84	---	51.137	49.629	---	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_21	1	703	0,84	---	49.627	50.103	---	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_22	1	703	0,84	---	51.116	50.265	---	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_23	10	703	0,84	7.500	50.304	49.981	41.567	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_24	10	552	0,66	---	49.466	48.651	---	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_25	10	560	0,72	47.500	50.936	49.444	41.020	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_26	1	---	---	---	50.534	49.830	---	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_27	10	628	0,75	---	49.689	48.798	---	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_28	10	634	0,85	---	51.152	50.014	---	---	---	---	---	---	---	
Alt05_B95_29	---	819,6	---	---	51.147	49.414	---	---	---	---	---	---	---	Stat
Alt05_B95_30	---	851,8	---	---	51.404	49.640	---	---	---	---	---	---	---	Stat
Alt05_B95_31	---	840,4	---	---	50.937	49.888	40.50	---	---	---	---	---	---	Stat (190d)

Anhang

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [/]	N [/]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent,0}$ [MPa]	D_0 bzw. E_{stat} [MPa]	T_N [d]	\dot{D} [MPa·s ⁻¹]	$\frac{D_N}{D_0}$ [/]	$\frac{D_{n,w}}{D_0}$ [/]	ϵ_{ges} [‰]	$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$ [MPa]	Bemerkung
Alt06_B25_01	---	289,2	---	---	38.758	34.568	---	---	---	---	---	2,44	---	Stat (343d)
Alt06_B25_02	---	282,7	---	---	38.900	35.558	---	---	---	---	---	2,29	---	Stat (343d)
Alt06_B25_03	---	264,4	---	---	38.692	33.869	---	---	---	---	---	2,42	---	Stat (343d)
Alt06_B25_04	10	240	0,84	600	39.344	35.027	30.200	0,0006	9,350	0,589	0,687	2,58	---	
Alt06_B25_05	10	240	0,84	700	39.204	35.384	31.000	0,0008	8,320	0,645	0,753	2,26	52,5	
Alt06_B25_06	10	240	0,84	2.500	39.140	35.488	32.000	0,0028	1,744	0,618	0,681	2,42	---	
Alt06_B25_07	10	215	0,75	172.500	38.556	36.159	32.400	0,2690	0,009	0,508	0,668	2,37	19,4	
Alt06_B25_08	10	215	0,75	77.500	38.683	35.926	32.300	0,0896	0,089	0,530	0,673	2,03	27,1	
Alt06_B25_09	10	215	0,75	7.500	38.836	34.332	29.700	0,0086	0,708	0,642	0,711	2,28	44,3	
Alt06_B25_10	10	215	0,75	70.000	38.270	34.572	30.970	0,0810	0,090	0,533	0,664	2,30	26,8	
Alt06_B25_11	10	215	0,75	140.000	39.280	35.513	31.570	0,1620	0,056	0,483	0,650	2,11	23,8	
Alt06_B25_12	10	190	0,64	166.900	38.160	34.414	30.000	0,1910	0,041	0,503	0,606	2,62	31,7	
Alt06_B25_13	10	172	0,58	3.740.000	37.859	34.668	31.127	---	---	---	---	3,50	---	
Alt06_B25_14	---	---	---	---	38.840	35.223	---	---	---	---	---	---	---	
Alt06_B25_15	---	---	---	---	38.066	35.744	---	---	---	---	---	---	---	
Alt06_B25_16	---	---	---	---	38.359	36.529	---	---	---	---	---	---	---	
Alt06_B25_17	---	---	---	---	39.494	37.579	---	---	---	---	---	---	---	
Alt06_B25_18	---	---	---	---	39.931	37.753	---	---	---	---	---	---	---	
Alt06_B25_19	---	---	---	---	38.844	35.919	---	---	---	---	---	---	---	
Alt06_B25_20	---	---	---	---	37.799	33.864	---	---	---	---	---	---	---	
Alt06_B25_21	---	---	---	---	38.975	35.920	---	---	---	---	---	---	---	
Alt06_B25_22	---	---	---	---	38.062	35.892	---	---	---	---	---	---	---	
Alt06_B25_23	---	---	---	---	39.208	36.374	---	---	---	---	---	---	---	
Alt06_B25_24	---	---	---	---	39.768	37.273	---	---	---	---	---	---	---	
Alt06_B25_25	---	---	---	---	38.559	35.180	---	---	---	---	---	---	---	
Alt06_B25_26	---	294,9	---	---	38.369	35.350	31.697	---	---	---	---	---	---	Stat (348d)
Alt06_B25_27	---	305,3	---	---	38.890	35.625	32.576	---	---	---	---	---	---	Stat (348d)
Alt06_B25_28	---	291,9	---	---	38.991	36.168	32.743	---	---	---	---	---	---	Stat (348d)
Alt06_B25_29	---	294,5	---	---	40.374	36.795	32.253	---	---	---	---	---	---	Stat (140d)
Alt07_B95_01	---	792	1,00	---	52.685	49.825	---	197	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt07_B95_02	---	811	1,00	---	52.627	50.168	---	201	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt07_B95_03	---	807	1,00	---	52.791	49.477	---	201	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt07_B95_04	---	763	0,95	---	52.011	48.763	---	315	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt07_B95_05	---	763	0,95	---	53.586	49.512	---	223	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt07_B95_06	---	682	0,85	---	52.597	50.790	---	6523	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt07_B95_07	---	682	0,85	---	53.408	50.098	---	3821	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt07_B95_29	---	790,7	---	---	52.432	49.351	43.016	---	---	---	---	---	---	Stat (129d)

Anhang

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [/]	N [/]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent,0}$ [MPa]	$E_{stat,0}$ [MPa]	$E_{dyn,US,n}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent,n}$ [MPa]	$E_{stat,n}$ [MPa]	$\beta_{c,n}$ [/]	T [sec]	Bemerkung
Alt8-B45-1	5	336	0,79	10.700	45.787	41.876	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt8-B45-2	5	336	0,79	2.200	45.879	42.738	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt8-B45-3	5	336	0,79	1.930	44.037	41.660	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt8-B45-4	5	300	0,71	18.600	46.344	42.208	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt8-B45-5	5	300	0,71	16.750	46.160	42.935	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt8-B45-6	5	300	0,71	15.410	46.241	42.110	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt8-B45-7	---	421,9	---	---	46.678	42.695	36.281	---	---	---	---	---	Stat (126d)
Alt8-B45-8	---	432,4	---	---	46.461	42.791	37.336	---	---	---	---	---	Stat (126d)
Alt8-B45-9	---	417,6	---	---	46.253	45.065	39.171	---	---	---	---	---	Stat (126d)
Alt8-B45-10	5	300	0,71	20.400	46.382	41.992	---	37.912	32.358	25.283	416,8	---	US, n/N = 0,70
Alt8-B45-11	5	300	0,71	66.140	47.386	43.038	---	36.641	32.447	25.538	383,8	---	US, n/N = 0,98
Alt8-B45-12	5	300	0,71	56.010	46.176	44.346	---	38.962	36.363	28.239	435,2	---	US, n/N = 0,50
Alt8-B45-13	5	300	0,71	19.360	46.365	42.705	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt8-B45-14	5	300	0,71	19.420	46.122	42.541	---	37.289	29.850	26.148	337,9	---	US, n/N = 0,98
Alt8-B45-15	5	300	0,71	26.660	46.392	43.044	---	36.681	33.793	26.220	390,8	---	US, n/N = 0,58
Alt8-B45-16	5	300	0,71	7.730	45.874	42.475	---	37.944	34.049	24.844	384,8	---	US, n/N = 0,60
Alt8-B45-17	5	300	0,71	9.600	46.601	43.319	---	41.151	37.082	31.604	435,3	---	US, n/N = 0,08
Alt8-B45-18	5	300	0,71	4.340	45.775	43.060	---	---	36.873	30.833	426,0	---	US, n/N = 0,22
Alt8-B45-19	5	300	0,71	11.350	46.060	43.671	---	39.653	36.636	31.409	439,6	---	US, n/N = 0,07
Alt8-B45-20	5	300	0,71	6.470	46.207	43.261	---	40.344	36.892	32.217	421,4	---	US, n/N = 0,20
Alt8-B45-21	5	336	0,79	9.400	46.692	43.053	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt8-B45-22	5	336	0,79	10.210	44.664	43.112	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt8-B45-23	5	336	0,79	10.460	46.427	43.798	---	39.845	36.474	28.310	419,8	---	US, n/N = 0,80
Alt8-B45-24	5	336	0,79	3.690	46.033	43.375	---	39.860	37.011	30.433	410,2	---	US, n/N = 0,52
Alt8-B45-25	5	336	0,79	15.320	46.072	42.641	---	37.575	32.288	25.570	385,5	---	US, n/N = 0,88
Alt8-B45-26	5	336	0,79	1.730	46.596	43.020	---	42.014	36.518	30.175	428,6	---	US, n/N = 0,26
Alt8-B45-27	5	336	0,79	1.100	46.954	43.268	---	42.831	37.908	34.466	444,1	---	US, n/N = 0,10
Alt8-B45-28	5	336	0,79	680	44.976	43.168	---	40.980	37.987	32.954	413,3	---	US, n/N = 0,07
Alt8-B45-29	5	336	0,79	2.010	44.721	41.356	---	37.501	30.095	24.448	325,0	---	US, n/N = 0,99
Alt9-B25-1	5	187	0,64	139.800	41.484	36.357	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt9-B25-2	5	187	0,64	10.900	41.204	35.593	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt9-B25-3	5	187	0,64	21.700	42.118	37.610	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt9-B25-4	5	167	0,57	808.300	41.616	36.880	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt9-B25-5	5	167	0,57	1.422.300	42.776	37.353	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt9-B25-6	5	167	0,57	3.535.800	42.123	37.407	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt9-B25-7	---	290,5	---	---	41.397	38.580	30.692	---	---	---	---	---	Stat (118d)
Alt9-B25-8	---	283,8	---	---	41.517	39.243	38.355	---	---	---	---	---	Stat (118d)
Alt9-B25-9	---	306,1	---	---	41.430	37.821	29.350	---	---	---	---	---	Stat (118d)
Alt9-B25-10	---	288,1	---	---	40.345	38.044	---	---	---	---	---	---	Stat (118d)
Alt9-B25-11	5	187	0,64	49.200	41.211	38.688	---	33.856	31.290	26.391	283,0	---	US, n/N = 0,06
Alt9-B25-12	5	187	0,64	44.960	41.439	38.349	---	35.693	30.939	22.944	295,0	---	US, n/N = 0,10
Alt9-B25-13	5	187	0,64	536.480	41.665	38.169	---	30.663	25.839	17.692	271,9	---	US, n/N = 0,70
Alt9-B25-14	5	167	0,57	553.600	40.261	38.520	---	---	27.787	20.275	296,1	---	US, n/N = 0,04
Alt9-B25-15	5	167	0,57	3.602.100	40.584	37.108	---	29.283	23.186	16.107	280,5	---	US, n/N = 0,50
Alt9-B25-16	5	167	0,57	2.750.280	40.900	37.367	---	32.338	28.505	21.731	297,3	---	US, n/N = 0,08
Alt9-B25-17	5	187	0,64	893.190	41.903	39.024	---	33.141	29.203	20.377	290,9	---	US, n/N = 0,43
Alt9-B25-18	5	187	0,64	2.818.910	41.498	38.539	---	28.962	24.412	15.567	274,1	---	US, n/N = 0,89
Alt9-B25-19	5	187	0,64	703.560	41.313	38.860	---	---	---	---	---	---	US, n/N = 1,00
Alt9-B25-20	5	187	0,64	508.600	40.742	39.015	---	32.054	28.463	21.151	292,8	---	US, n/N = 0,65
Alt9-B25-21	5	187	0,64	695.770	40.393	37.902	---	30.960	29.124	21.141	299,7	---	US, n/N = 0,50
Alt9-B25-22	---	273	0,95	---	42.829	39.257	---	---	---	---	---	6948	Dauerstand, t/T=1,00
Alt9-B25-23	---	273	0,95	---	41.921	39.165	---	---	---	---	---	115	Dauerstand, t/T=1,00
Alt9-B25-24	---	273	0,95	---	40.932	37.057	---	---	---	---	---	19	Dauerstand, t/T=1,00
Alt9-B25-25	---	273	0,95	---	41.635	38.072	---	35.160	30.486	23.132	264,4	140	Dauerstand, t/T=0,93
Alt9-B25-26	---	273	0,95	---	40.816	37.569	---	35.457	31.417	23.242	277,5	38	Dauerstand, t/T=0,80
Alt9-B25-27	---	273	0,95	---	41.839	38.840	---	37.884	34.177	27.980	300,0	17	Dauerstand, t/T=0,25
Alt9-B25-28	---	273	0,95	---	39.944	38.740	---	36.873	33.216	23.851	280,5	5	Dauerstand, t/T=0,75
Alt9-B25-29	---	273	0,95	---	40.177	38.116	---	36.849	33.176	26.232	304,0	16	Dauerstand, t/T=0,36

Anhang

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [/]	N [/]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,Enl,0}$ [MPa]	D_0 bzw. E_{stat} [Mpa]	T_N [s]	$\beta_{C,t}$ [kN]	$\frac{D_N}{D_0}$ [/]	$\frac{D_{n,w}}{D_0}$ [/]	ϵ_{ges} [%]	$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$ [MPa]	Bemerkung
Alt10_B95_29	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	Stat
Alt10_B95_30	---	---	---	---	52.215	48.108	---	---	---	---	---	---	---	
Alt10_B95_31	---	---	---	---	51.708	49.676	---	---	---	---	---	---	---	
Alt11_B95_29	---	---	---	---			---	---	---	---	---	---	---	Stat
Alt11_B95_30	---	---	---	---	49.862	49.241	---	---	---	---	---	---	---	
Alt11_B95_31	---	---	---	---	50.201	49.599	---	---	---	---	---	---	---	
Alt12_B25_01	---	187	0,75	---	31.528	32.505	---	---	---	---	---	3,67	---	Dauerstand
Alt12_B25_02	---	187	0,75	---	29.482	28.287	---	---	---	---	---	3,33	---	Dauerstand
Alt12_B25_03	---	167	0,67	---	33.795	32.639	---	---	---	---	---	2,63	---	Dauerstand
Alt12_B25_04	---	167	0,67	---	31.176	29.530	---	---	---	---	---	2,67	---	Dauerstand
Alt12_B25_05	---	147	0,59	---	33.932	32.116	---	---	---	---	---	2,24	---	Dauerstand
Alt12_B25_06	---	147	0,59	---	34.911	33.050	---	---	---	---	---	1,97	---	Dauerstand
Alt12_B25_07	---	128	0,51	---	36.867	34.562	---	---	---	---	---	1,68	---	Dauerstand
Alt12_B25_08	---	128	0,51	---	35.178	33.654	---	---	---	---	---	1,33	---	Dauerstand
Alt12_B25_09	---	98	0,39	---	36.846	34.415	31.678	---	305,1	---	---	1,17	---	Dauerstand,Stat(269d)
Alt12_B25_10	---	98	0,39	---	36.947	34.682	32.735	---	295,1	---	---	0,89	---	Dauerstand,Stat(269d)
Alt12_B25_11	---	65	0,26	---	35.088	33.680	31.979	---	284,9	---	---	0,6	---	Dauerstand,Stat(269d)
Alt12_B25_12	---	65	0,26	---	36.098	33.481	31.813	---	297,2	---	---	0,62	---	Dauerstand,Stat(269d)
Alt12_B25_13	---	219	0,81	---	35.966	33.849	28.841	---	310,7	---	---	4,86	---	Dauerstand,Stat(269d)
Alt12_B25_14	---	219	0,81	---	36.216	34.022	31.429	---	301,7	---	---	4,73	---	Dauerstand,Stat(269d)
Alt12_B25_15	---	235	0,87	---	38.869	37.976	---	6.023	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt12_B25_16	---	235	0,87	---	38.286	36.163	---	4.789	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt12_B25_17	---	256	0,95	---	36.580	36.588	---	2.475	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt12_B25_18	---	256	0,95	---	37.494	36.669	---	2.225	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt12_B25_27	---	280,4	---	---	38.174	35.804	31.760	---	---	---	---	---	---	Stat (310d)
Alt12_B25_28	---	287,7	---	---	37.549	36.672	30.273	---	---	---	---	---	---	Stat (310d)
Alt12_B25_29	---	293,0	---	---	39.127	36.725	31.270	---	---	---	---	---	---	Stat (310d)
Alt12_B25_30	---	229,0	---	---	39.976	36.583	29.282	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt12_B25_31	---	239,0	---	---	39.614	37.492	30.271	---	---	---	---	[%]	---	Stat (28d)

Anhang

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [/]	N [/]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent,0}$ [MPa]	D_0 bzw. E_{stat} [MPa]	T_N [sek]	\dot{D} [MPa·s ⁻¹]	$\frac{D_N}{D_0}$ [/]	$\frac{D_{n,w}}{D_0}$ [/]	ϵ_{ges} [%]	$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$ [MPa]	Bemerkung
Alt13_B45_30	---	345,9	---	---	44.050	41.188	31.193	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt13_B45_31	---	341,8	---	---	44.105	41.167	33.546	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt14_B25_30	---	228,9	---	---	40.142	37.197	27.753	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt14_B25_31	---	224,8	---	---	38.524	35.582	26.960	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt15_B45_01	---	416,2	---	---	38.724	37.195	30.151	---	---	---	---	---	---	Stat (226d)
Alt15_B45_02	---	432,4	---	---	39.038	38.619	31.449	---	---	---	---	---	---	Stat (226d)
Alt15_B45_07	---	100	0,26	---	43.022	40.465	---	---	---	---	---	1,25	---	Dauerstand
Alt15_B45_08	---	100	0,26	---	43.187	41.162	---	---	---	---	---	1,58	---	Dauerstand
Alt15_B45_09	---	170	0,44	---	44.158	40.655	---	---	---	---	---	2,31	---	Dauerstand
Alt15_B45_10	---	170	0,44	---	43.493	40.866	---	---	---	---	---	1,95	---	Dauerstand
Alt15_B45_11	---	379,0	---	---	37.256	35.127	25.132	---	---	---	---	---	---	Stat (226d)
Alt15_B45_12	---	326,0	---	---	34.543	34.217	22.151	---	---	---	---	---	---	Stat (226d)
Alt15_B45_13	---	200	0,52	---	43.557	41.757	---	---	---	---	---	2,65	---	Dauerstand
Alt15_B45_14	---	200	0,52	---	43.792	40.936	---	---	---	---	---	2,58	---	Dauerstand
Alt15_B45_15	---	230	0,59	---	43.021	40.475	---	---	---	---	---	3,26	---	Dauerstand
Alt15_B45_16	---	230	0,59	---	43.087	40.862	---	---	---	---	---	2,95	---	Dauerstand
Alt15_B45_17	---	265	0,68	---	44.138	40.715	---	---	---	---	---	4,11	---	Dauerstand
Alt15_B45_18	---	265	0,68	---	43.192	40.872	---	---	---	---	---	3,89	---	Dauerstand
Alt15_B45_19	---	300	0,77	---	44.486	41.981	---	---	---	---	---	5,26	---	Dauerstand
Alt15_B45_20	---	300	0,77	---	43.823	40.634	---	---	---	---	---	4,76	---	Dauerstand
Alt15_B45_21	---	324	0,84	---	43.592	40.766	---	5.120	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt15_B45_22	---	324	0,84	---	43.221	40.565	---	4.784	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt15_B45_23	---	336	0,87	---	43.771	40.954	---	1.860	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt15_B45_24	---	336	0,87	---	43.831	40.494	---	4.063	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt15_B45_25	---	354	0,91	---	43.286	40.862	---	186	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt15_B45_26	---	354	0,91	---	44.134	41.113	---	210	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt15_B45_27	---	380	1,00	---	43.174	40.973	---	95	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt15_B45_28	---	395	1,00	---	44.587	41.992	---	99	---	---	---	---	---	Dauerstand
Alt15_B45_30	---	323,4	---	---	43.908	39.939	32.897	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt15_B45_31	---	349,5	---	---	44.209	40.902	30.912	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt16_B25_30	---	249,5	---	---	31.469	27.058	22.251	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt16_B25_31	---	256,1	---	---	30.534	27.397	21.591	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)

Anhang

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [/]	N [/]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent,0}$ [MPa]	D_0 bzw. E_{stat} [MPa]	T_N [d]	\dot{D} [MPa·s ⁻¹]	$\frac{D_N}{D_0}$ [/]	$\frac{D_{n,w}}{D_0}$ [/]	ϵ_{ges} [%]	$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$ [MPa]	Bemerkung
Alt17_B95_01	---	798,0	---	---	50.939	50.546	---	---	---	---	---	---	---	Stat (171d)
Alt17_B95_02	---	799,2	---	---	51.293	50.314	---	---	---	---	---	---	---	Stat (171d)
Alt17_B95_03	---	778,2	---	---	50.357	49.817	---	---	---	---	---	---	---	Stat (171d)
Alt17_B95_04	10	666	0,84	2.500	50.184	51.230	41.768	---	---	---	---	---	---	
Alt17_B95_05	10	666	0,84	2.500	51.828	50.229	43.200	---	---	---	---	---	---	
Alt17_B95_06	10	666	0,84	2.300	51.891	49.772	41.000	---	---	---	---	---	---	
Alt17_B95_07	10	595	0,75	40.000	52.856	51.211	42.460	---	---	---	---	---	---	
Alt17_B95_08	10	595	0,75	27.500	52.203	51.795	43.370	---	---	---	---	---	---	
Alt17_B95_09	10	595	0,75	22.500	51.647	51.161	42.200	---	---	---	---	---	---	
Alt17_B95_10	---	815,0	---	---	52.895	51.252	41.144	---	---	---	---	---	---	Stat (310d)
Alt17_B95_11	10	527	0,66	62.500	50.110	48.529	41.248	---	---	---	---	---	---	
Alt17_B95_12	10	527	0,66	62.500	49.876	49.353	41.983	---	---	---	---	---	---	
Alt17_B95_13	---	---	---	---	49.338	48.928	---	---	---	---	---	---	---	
Alt17_B95_14	1	527	0,66	2.660.709	49.310	50.180	---	---	---	---	---	---	---	
Alt17_B95_15	10	479	0,60	707.500	50.737	49.536	41.220	---	---	---	---	---	---	
Alt17_B95_16	10	527	0,66	47.500	49.915	49.165	42.530	---	---	---	---	---	---	Wasser
Alt17_B95_17	10	527	0,66	17.500	50.416	48.683	41.280	---	---	---	---	---	---	Wasser
Alt17_B95_18	10	527	0,66	27.500	51.722	50.479	42.931	---	---	---	---	---	---	Wasser
Alt17_B95_30	---	693,1	---	---	50.280	50.083	41.152	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt17_B95_31	---	699,0	---	---	51.139	49.786	41.902	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt18_B45_01	---	375,3	---	---	45.453	41.889	34.430	---	---	---	---	---	---	Stat (160d), Wasser
Alt18_B45_02	---	385,7	---	---	42.933	41.696	34.680	---	---	---	---	---	---	Stat (160d), Wasser
Alt18_B45_03	---	366,4	---	---	44.756	41.517	34.120	---	---	---	---	---	---	Stat (160d), Wasser
Alt18_B45_04	10	336	0,89	200	45.933	41.709	33.030	0,0002	60,438	0,582	0,765	---	---	Wasser
Alt18_B45_05	10	336	0,89	100	45.338	42.319	33.450	0,0001	---	---	---	---	---	Wasser
Alt18_B45_06	10	336	0,89	100	45.133	41.877	33.351	0,0001	---	---	---	---	---	Wasser
Alt18_B45_07	10	336	0,84	600	45.140	42.360	33.590	0,0008	5,665	0,846	0,895	2,01	24,6	
Alt18_B45_08	10	336	0,84	900	43.602	42.165	34.380	0,0004	10,072	0,818	0,879	1,90	32,4	Haltezeit 1 min.
Alt18_B45_09	10	336	0,84	700	44.956	41.652	33.501	0,0006	6,259	0,799	0,858	2,16	36,8	Haltezeit 1 min.
Alt18_B45_10	10	336	0,84	500	44.089	42.628	35.000	0,0005	10,292	0,797	0,853	1,58	35,0	Haltezeit 5 min.
Alt18_B45_11	10	336	0,84	800	44.901	42.652	33.744	0,0008	6,474	0,723	0,851	2,31	31,6	Haltezeit 1 min.
Alt18_B45_12	10	336	0,84	1.000	44.221	42.549	34.390	0,0012	4,406	0,747	0,885	2,00	27,8	Haltezeit 5 min.
Alt18_B45_13	10	336	0,84	700	44.784	41.534	33.000	0,0008	7,262	0,734	0,870	2,37	24,4	Haltezeit 5 min.
Alt18_B45_14	---	336	0,84	---	44.815	42.276	---	---	---	---	---	---	---	
Alt18_B45_15	10	336	0,84	400	44.719	41.540	33.200	0,0004	13,335	0,779	0,860	1,79	33,2	Haltezeit 30 min
Alt18_B45_16	10	336	0,84	800	44.691	42.110	34.177	0,0009	11,349	0,663	0,830	2,27	31,3	Haltezeit 30 min
Alt18_B45_17	10	336	0,84	400	42.253	41.792	34.600	0,0004	14,659	0,748	0,834	2,28	32,2	Haltezeit 30 min
Alt18_B45_18	10	336	0,84	1.900	43.536	42.281	35.000	0,0011	5,142	0,748	0,857	2,22	26,2	OHNE Haltezeit
Alt18_B45_19	10	336	0,84	1.700	44.824	41.740	34.150	0,0020	2,700	0,748	0,839	2,33	25,6	OHNE Haltezeit
Alt18_B45_20	10	336	0,84	2.100	46.038	43.079	35.800	0,0026	2,595	0,744	0,838	2,25	25,7	OHNE Haltezeit
Alt18_B45_21	10	336	0,84	1.000	44.803	42.760	35.350	0,0012	5,477	0,728	0,830	2,19	32,1	Haltezeit 1 min.
Alt18_B45_22	10	336	0,84	400	44.680	40.633	33.700	0,0003	22,910	0,727	0,837	2,41	46,1	Haltezeit 5 min.
Alt18_B45_23	10	336	0,84	600	44.953	41.444	33.600	0,0001	47,640	0,861	---	1,92	47,6	Haltezeit 120 min.
Alt18_B45_24	10	336	0,84	1.000	46.087	41.860	34.800	0,0012	3,806	0,788	0,859	2,03	27,6	Haltezeit 1 min.
Alt18_B45_25	10	336	0,84	600	44.978	42.549	35.180	0,0011	3,926	0,801	0,870	2,05	22,1	Haltezeit 120 min.
Alt18_B45_26	10	336	0,84	400	45.227	42.653	34.703	0,0019	3,431	0,720	0,831	2,01	26,6	Haltezeit 120 min.
Alt18_B45_27	---	407,8	---	---	45.222	40.004	33.500	---	---	---	---	---	---	Stat (160d)
Alt18_B45_28	---	400,1	---	---	44.511	42.434	36.130	---	---	---	---	---	---	Stat (160d)
Alt18_B45_29	---	390,0	---	---	44.696	41.740	34.900	---	---	---	---	---	---	Stat (160d)
Alt18_B45_30	---	345,2	---	---	43.645	41.292	32.712	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt18_B45_31	---	343,2	---	---	43.508	41.649	29.234	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)

Anhang

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [/]	N [/]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent,0}$ [MPa]	D_0 bzw. E_{stat} [MPa]	T_N [d]	\dot{D} [MPa·s ⁻¹]	$\frac{D_N}{D_0}$ [/]	$\frac{D_{n,w}}{D_0}$ [/]	ϵ_{ges} [%]	$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$ [MPa]	Bemerkung
Alt19_B45_01	---	425,2	---	---	44.385	40.965	---	---	---	---	---	2,53	---	Stat (162d)
Alt19_B45_02	---	432,8	---	---	45.122	41.743	---	---	---	---	---	2,33	---	Stat (162d)
Alt19_B45_03	---	410,7	---	---	44.988	40.577	---	---	---	---	---	2,42	---	Stat (162d)
Alt19_B45_04	10	355	0,84	1.400	45.242	41.034	34.700	0,0016	---	---	0,862	2,20	17,7	
Alt19_B45_05	10	355	0,84	600	45.080	40.747	34.694	0,0006	8,480	0,753	0,844	2,52	35,4	
Alt19_B45_06	10	317	0,75	12.500	45.128	41.401	35.000	0,0144	0,498	0,746	0,843	1,88	15,2	
Alt19_B45_07	10	317	0,75	10.000	45.438	41.477	35.220	0,0115	0,448	0,778	0,846	1,78	20,5	
Alt19_B45_08	10	317	0,75	10.000	46.292	41.411	34.950	0,0115	0,511	0,763	0,839	1,97	16,6	
Alt19_B45_09	10	355	0,84	600	46.120	41.538	33.550	0,0006	8,929	0,769	0,863	2,63	28,6	
Alt19_B45_10	10	279	0,66	117.500	45.838	40.924	34.980	0,1359	0,044	0,689	0,800	---	13,1	
Alt19_B45_11	10	279	0,66	287.500	45.844	40.841	34.235	0,3327	0,024	0,625	0,755	---	6,5	
Alt19_B45_12	10	279	0,66	187.500	46.696	42.636	35.878	0,2170	0,035	0,661	0,781	---	9,6	
Alt19_B45_13	---	---	---	---	43.379	42.055	---	---	---	---	---	---	---	Stat weg
Alt19_B45_14	---	---	---	---	43.574	41.203	---	---	---	---	---	---	---	Stat weg
Alt19_B45_15	---	---	---	---	43.171	41.504	35.044	---	---	---	---	---	---	Stat weg
Alt19_B45_16	---	---	---	---	43.351	41.485	---	---	---	---	---	---	---	Stat weg
Alt19_B45_17	10	355	0,84	1.854	44.347	40.900	---	---	---	---	---	---	---	ohne Rampe
Alt19_B45_18	10	279	0,66	176.090	43.697	41.245	---	---	---	---	---	---	---	ohne Rampe
Alt19_B45_19	10	355	0,84	559	44.056	41.107	---	---	---	---	---	---	---	ohne Rampe
Alt19_B45_20	10	355	0,84	3.855	43.712	40.899	---	---	---	---	---	---	---	ohne Rampe
Alt19_B45_21	10	279	0,66	154.650	43.741	40.328	---	---	---	---	---	---	---	ohne Rampe
Alt19_B45_22	10	355	0,84	968	44.256	41.136	33.900	---	---	---	---	---	---	Haltezeit 5 min.
Alt19_B45_23	10	279	0,66	405.000	44.016	40.808	---	---	---	---	---	---	---	Haltezeit 30 min.
Alt19_B45_24	10	279	0,66	430.000	43.136	41.240	---	---	---	---	---	---	---	Haltezeit 5 min.
Alt19_B45_25	10	279	0,66	320.000	42.496	40.807	---	---	---	---	---	---	---	Haltezeit 5 min.
Alt19_B45_26	1	355	0,84	200	43.595	39.429	33.435	---	---	---	---	2,60	---	
Alt19_B45_27	1	334	0,79	2.540	44.177	40.681	35.000	---	---	---	---	2,11	---	
Alt19_B45_28	1	255	0,60	2.150.000	45.049	40.349	---	---	---	---	---	3,56	---	
Alt19_B45_29	1	279	0,66	745.000	43.999	41.292	---	---	---	---	---	2,51	---	
Alt19_B45_30	---	334,1	---	---	44.701	42.303	36.137	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt19_B45_31	---	342,0	---	---	42.375	40.558	32.287	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)

Anhang

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [/]	N [/]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent,0}$ [MPa]	D_0 bzw. E_{stat} [MPa]	T_N [d]	\dot{D} [MPa·s ⁻¹]	$\frac{D_N}{D_0}$ [/]	$\frac{D_{n,w}}{D_0}$ [/]	ϵ_{ges} [%]	$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$ [MPa]	Bemerkung
Alt20_B95_30	---	792,0	---	---	51.706	52.006	43.568	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt20_B95_31	---	762,0	---	---	50.168	50.261	42.308	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt21_B25_01	---	262,1	---	---	40.512	37.045	---	---	---	---	---	2,62	---	Stat (149d)
Alt21_B25_02	---	266,2	---	---	40.064	36.351	---	---	---	---	---	2,64	---	Stat (149d)
Alt21_B25_03	---	258,6	---	---	39.808	35.798	---	---	---	---	---	2,45	---	Stat (149d)
Alt21_B25_04	10	220	0,84	3.600	40.628	37.526	31.750	0,0018	3,523	0,585	0,701	2,64	54,1	
Alt21_B25_05	10	220	0,84	1.100	40.019	36.705	30.600	0,0012	5,774	0,548	0,697	2,76	60,4	
Alt21_B25_06	10	220	0,84	1.300	39.417	36.421	30.647	0,0015	4,614	0,542	0,690	2,93	60,1	
Alt21_B25_07	10	197	0,75	10.000	39.450	35.894	29.750	0,0115	0,496	0,635	0,710	2,20	33,6	
Alt21_B25_08	10	197	0,75	17.500	40.924	36.920	30.000	0,0202	0,324	0,550	0,685	2,84	33,8	
Alt21_B25_09	10	197	0,75	22.500	40.656	37.436	31.000	0,0260	0,241	0,628	0,722	2,26	25,3	
Alt21_B25_10	10	173	0,66	1.135.000	40.186	37.422	31.000	1,3130	0,005	0,498	0,608	3,51	8,3	
Alt21_B25_11	10	173	0,66	1.365.000	41.452	37.878	31.855	1,5798	0,005	0,435	0,591	3,20	17,8	
Alt21_B25_12	10	156	0,60	6.450.000	40.069	35.762	30.750	---	---	---	---	3,79	9,4	
Alt21_B25_13	10	200	0,76	25.000	40.928	37.188	30.640	---	---	---	---	2,35	---	Verformung
Alt21_B25_14	10	195	0,74	22.500	40.524	37.354	30.170	---	---	---	---	2,20	---	Verformung
Alt21_B25_15	10	204	0,78	17.500	41.662	37.947	31.040	---	---	---	---	2,31	---	Verformung
Alt21_B25_16	10	206	0,79	25.000	41.148	37.582	30.600	---	---	---	---	---	---	Verformung
Alt21_B25_17	10	231	0,88	15.000	41.844	39.126	33.700	---	---	---	---	---	---	Verformung
Alt21_B25_18	10	225	0,86	20.000	40.728	38.907	32.800	---	---	---	---	---	---	Verformung
Alt21_B25_19	10	156	0,60	5.560.487	42.345	37.861	32.930	---	0,008	---	---	3,91	7,6	
Alt21_B25_20	---	---	---	---	40.363	37.193	---	---	---	---	---	---	---	low-cycles-fatigue
Alt21_B25_21	---	---	---	---	41.170	39.091	---	---	---	---	---	---	---	low-cycles-fatigue
Alt21_B25_22	20	220	0,75	25.000	39.045	37.704	33.300	---	---	---	---	---	---	
Alt21_B25_23	20	220	0,75	17.500	39.596	36.295	31.400	---	---	---	---	---	---	
Alt21_B25_24	10	220	0,75	27.500	39.184	37.962	32.410	---	---	---	---	---	---	
Alt21_B25_25	---	294,2	---	---	39.825	38.055	---	---	---	---	---	---	---	Stat (203d)
Alt21_B25_26	20	245	0,83	3.531	39.363	37.937	---	---	---	---	---	---	---	
Alt21_B25_27	20	245	0,83	10.263	40.221	38.308	---	---	---	---	---	---	---	
Alt21_B25_28	---	---	---	---	39.343	37.193	---	---	---	---	---	---	---	
Alt21_B25_29	---	---	---	---	38.390	35.183	---	---	---	---	---	---	---	
Alt21_B25_30	---	178,3	---	---	38.090	34.335	22.242	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt21_B25_31	---	---	---	---	40.730	37.295	---	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [/]	N [/]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent,0}$ [MPa]	D_0 bzw. E_{stat} [MPa]	T_N [d]	\dot{D} [MPa·s ⁻¹]	$\frac{D_N}{D_0}$ [/]	$\frac{D_{n,w}}{D_0}$ [/]	ϵ_{ges} [%]	$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$ [MPa]	Bemerkung
Alt22_B25_01	---	203,2	---	---	28.874	24.118	---	---	---	---	---	2,28	---	Stat (143d)
Alt22_B25_02	---	232,4	---	---	30.286	26.448	---	---	---	---	---	2,67	---	Stat (143d)
Alt22_B25_03	---	239,3	---	---	29.852	27.534	---	---	---	---	---	2,48	---	Stat (143d)
Alt22_B25_04	10	198	0,84	300	28.600	26.441	22080	0,0003	14,930	0,686	0,797	2,26	39,3	
Alt22_B25_05	10	198	0,84	500	28.812	25.217	20650	0,0057	---	0,629	0,779	2,68	34,4	
Alt22_B25_06	10	198	0,84	100	28.697	25.189	19400	0,0001	---	0,683	---	2,49	---	
Alt22_B25_07	10	177	0,75	2.200	28.947	25.412	21500	0,0025	1,404	0,758	0,839	1,90	18,0	
Alt22_B25_08	10	177	0,75	2.500	30.128	26.648	21300	0,0028	1,035	0,754	0,810	1,77	22,0	
Alt22_B25_09	10	177	0,75	10.000	29.373	27.055	23300	0,0115	0,315	0,767	0,833	1,84	11,7	
Alt22_B25_10	10	156	0,66	730.000	29.867	27.107	23621	0,8449	0,006	0,537	0,697	2,55	6,7	
Alt22_B25_11	10	156	0,66	55.000	27.402	25.304	21530	0,0630	0,054	0,736	0,819	1,72	7,1	
Alt22_B25_12	10	156	0,66	70.000	28.197	24.814	19539	0,0810	0,031	0,765	0,823	1,62	7,0	
Alt22_B25_13	10	142	0,60	2.322.248	28.810	25.795	22360	---	---	---	---	2,35	---	
Alt22_B25_14	---	---	---	---	29.275	25.919	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_15	---	---	---	---	30.458	28.354	21528	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_16	---	---	---	---	29.784	27.777	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_17	---	---	---	---	28.659	26.448	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_18	---	---	---	---	28.911	25.403	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_19	---	---	---	---	29.044	26.940	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_20	---	---	---	---	29.393	26.993	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_21	---	---	---	---	28.069	27.291	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_22	---	---	---	---	28.738	27.396	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_23	---	---	---	---	27.425	26.233	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_24	---	---	---	---	26.076	25.040	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_25	---	---	---	---	28.443	26.507	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_26	---	---	---	---	28.087	26.512	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_27	---	---	---	---	28.331	26.512	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_28	---	---	---	---	28.242	26.302	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_29	---	---	---	---	27.090	25.063	---	---	---	---	---	---	---	
Alt22_B25_30	---	214,6	---	---	29.845	26.903	24.215	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt22_B25_31	---	222,1	---	---	29.662	26.959	23.287	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt23_B25_30	---	235,0	---	---	40.027	38.147	31.774	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt23_B25_31	---	236,0	---	---	40.532	36.943	31.035	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)

Anhang

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [l]	N [l]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent,0}$ [MPa]	D_0 bzw. E_{stat} [MPa]	T_N [d]	\dot{D} [MPa·s ⁻¹]	$\frac{D_N}{D_0}$ [l]	$\frac{D_{n,w}}{D_0}$ [l]	ϵ_{ges} [%]	$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$ [MPa]	Bemerkung
Alt24_B25_28	---	---	---	---	42.407	38.646	30.834	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt24_B25_29	---	---	---	---	41.705	37.929	31.390	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt24_B25_30	---	264,0	---	---	41.549	38.794	34.793	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt24_B25_31	---	265,2	---	---	41.867	37.993	33.222	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt25_B25_28	---	---	---	---	42.368	38.335	31.745	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt25_B25_29	---	---	---	---	39.976	38.273	31.348	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt25_B25_30	---	263,2	---	---	41.589	38.278	34.250	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt25_B25_31	---	266,8	---	---	41.505	37.089	32.469	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt26_B25_28	---	---	---	---	41.968	38.395	30.336	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt26_B25_29	---	---	---	---	42.504	38.608	30.813	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt26_B25_30	---	276,4	---	---	42.336	38.670	35.076	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt26_B25_31	---	277,6	---	---	41.987	38.939	33.880	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt27_B25_28	---	---	---	---	42.235	37.576	29.679	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt27_B25_29	---	---	---	---	43.067	39.500	31.821	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt27_B25_30	---	269,7	---	---	41.649	37.824	31.614	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt27_B25_31	---	257,0	---	---	41.806	37.755	33.035	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt28_B25_28	---	---	---	---	41.500	36.299	28.616	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt28_B25_29	---	---	---	---	41.663	37.605	30.044	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt28_B25_30	---	261,7	---	---	40.850	37.410	32.370	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt28_B25_31	---	269,6	---	---	41.723	38.762	33.131	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt29_B25_28	---	---	---	---	44.845	40.459	32.736	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt29_B25_29	---	---	---	---	45.543	41.742	35.083	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt29_B25_30	---	386,1	---	---	44.224	41.940	39.467	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt29_B25_31	---	400,6	---	---	43.366	41.669	38.378	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt30_B25_28	---	---	---	---	45.145	41.270	35.553	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt30_B25_29	---	---	---	---	46.176	42.178	35.347	---	---	---	---	---	---	Stat (28d) nach DIN
Alt30_B25_30	---	377,6	---	---	44.575	41.169	33.685	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
Alt30_B25_31	---	398,2	---	---	44.510	41.825	32.122	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)

Anhang

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [/]	N [/]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent,0}$ [MPa]	D_0 bzw. E_{stat} [Mpa]	T_N [d]	\dot{D} [MPa·s ⁻¹]	$\frac{D_N}{D_0}$ [/]	$\frac{D_{n,w}}{D_0}$ [/]	ϵ_{ges} [%]	$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$ [MPa]	Bemerkung
S4_B45_01	10	300	0,71	2.200	48.058	46.221	36.437	0,0025	3,488	0,597	0,788	2,17	---	
S4_B45_02	10	336	0,80	700	48.315	46.538	35.684	0,0008	9,426	0,702	0,817	1,95	---	
S4_B45_03	10	336	0,80	300	48.492	47.762	36.100	0,0003	24,773	0,692	0,802	1,93	---	
S4_B45_04	10	300	0,71	1.700	47.574	46.840	36.148	0,0019	3,871	0,642	0,776	2,13	---	
S4_B45_05	10	264	0,63	7.500	47.960	46.813	35.675	0,0086	0,570	0,725	0,791	1,59	---	
S4_B45_06	5	300	0,71	1.500	47.637	47.460	36.829	0,0034	4,349	0,674	0,802	1,73	---	
S4_B45_07	5	300	0,71	900	48.198	46.755	35.880	0,0010	6,887	0,678	0,796	2,05	---	
S4_B45_08	10	264	0,63	7.500	47.334	46.789	36.322	0,0086	0,936	0,679	0,782	1,56	---	
S4_B45_09	10	230	0,55	77.500	48.262	46.108	34.380	0,0896	0,059	0,687	0,787	1,64	---	
S4_B45_10	10	230	0,55	67.500	47.929	46.541	36.610	0,0781	0,094	0,657	0,791	1,56	---	
S4_B45_11	---	432,6	---	---	48.249	48.061	36.694	---	---	---	---	---	---	Stat (164d)
S4_B45_12	---	420,5	---	---	47.162	48.198	38.146	---	---	---	---	---	---	Stat (164d)
S4_B45_13	5	336	0,80	200	48.255	46.940	34.736	0,0004	57,755	0,614	0,783	2,51	---	
S4_B45_14	---	---	---	---	47.793	46.351	---	---	---	---	---	---	---	
S4_B45_15	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
S4_B45_16	5	336	0,80	200	47.155	46.628	35.620	0,0004	26,817	0,751	0,826	2,01	---	
S4_B45_17	---	---	---	---	47.933	45.804	---	---	---	---	---	---	---	
S4_B45_18	5	264	0,63	2.500	47.956	46.905	35.920	0,0057	1,326	0,809	0,837	1,51	---	
S4_B45_19	5	264	0,63	5.000	48.372	47.514	35.562	0,0115	1,552	0,643	0,769	1,60	---	
S4_B45_20	5	336	0,80	300	48.367	47.404	36.044	0,0006	32,930	0,681	0,801	2,06	---	
S4_B45_21	5	336	0,80	300	48.966	47.735	36.418	0,0006	15,843	0,755	0,827	2,09	---	
S4_B45_22	10	264	0,63	10.000	48.631	47.428	35.657	0,0115	0,527	0,682	0,764	1,66	---	
S4_B45_23	10	300	0,71	1.300	48.443	46.655	35.160	0,0030	6,308	0,596	0,782	2,25	---	
S4_B45_24	10	336	0,80	400	48.985	47.164	34.880	0,0004	17,191	0,673	0,783	2,20	---	
S4_B45_25	1	336	0,80	100	49.162	49.163	37.273	0,0011	80,098	---	0,785	1,58	---	
S4_B45_26	1	336	0,80	100	48.847	48.071	35.460	0,0011	90,736	---	0,730	1,92	---	
S4_B45_27	---	---	---	---	48.390	47.607	---	---	---	---	---	---	---	
S4_B45_28	---	---	---	---	48.956	47.789	---	---	---	---	---	---	---	
S4_B45_29	---	---	---	---	48.881	47.567	---	---	---	---	---	---	---	
S4_B45_30	---	460,0	---	---	49.792	49.024	43.562	---	---	---	---	---	---	Stat (311d)
S4_B45_31	---	457,2	---	---	48.981	48.364	42.367	---	---	---	---	---	---	Stat (311d)

Anhang

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [/]	N [/]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,Ent,0}$ [MPa]	D_0 bzw. E_{stat} [MPa]	T_N [d]	\dot{D} [MPa·s ⁻¹]	$\frac{D_N}{D_0}$ [/]	$\frac{D_{n,w}}{D_0}$ [/]	ϵ_{ges} [%]	$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$ [MPa]	Bemerkung
S5_B25_06	20	187	0,73	40.000	45.802	42.988	19.018	0,0462	0,067	0,673	0,764	---	---	-50°C
S5_B25_07	20	187	0,70	2.500	46.102	43.328	33.460	0,0014	2,346	0,623	0,705	2,05	---	
S5_B25_08	20	187	0,70	5.000	44.897	44.143	34.394	0,0028	1,492	0,587	0,694	1,53	---	
S5_B25_09	10	187	0,70	2.500	46.426	43.780	34.508	0,0028	2,342	0,604	0,726	1,49	---	
S5_B25_10	10	187	0,70	2.100	45.230	42.445	33.378	0,0023	3,867	0,481	0,674	2,36	---	
S5_B25_11	20	167	0,62	22.500	45.794	43.053	32.803	0,0130	0,425	0,666	0,507	1,98	---	
S5_B25_12	20	167	0,62	70.000	46.421	44.345	35.002	0,0405	0,253	0,501	0,627	1,97	---	
S5_B25_13	10	167	0,62	25.000	46.049	43.941	34.150	0,0289	0,320	0,433	0,664	1,87	---	
S5_B25_14	10	167	0,62	17.500	44.825	44.278	34.370	0,0202	0,391	0,590	0,702	1,66	---	
S5_B25_15	5	187	0,70	2.500	46.242	44.541	35.693	0,0057	2,162	0,667	0,731	1,54	---	
S5_B25_16	5	187	0,70	1.800	46.322	44.390	33.761	0,0041	4,574	0,512	0,668	2,13	---	
S5_B25_17	5	167	0,62	15.000	46.593	44.564	34.439	0,0347	0,459	0,560	0,671	1,88	---	
S5_B25_18	5	167	0,62	25.000	45.003	44.904	34.876	0,0578	0,300	0,535	0,678	2,02	---	
S5_B25_19	---	---	---	---	43.966	43.317	---	---	---	---	---	---	---	65-85
S5_B25_20	20	147	0,55	287.500	44.864	44.384	33.230	0,1663	0,021	0,475	0,668	2,43	---	
S5_B25_21	---	---	---	---	43.936	43.209	---	---	---	---	---	---	---	Stat
S5_B25_22	---	250,6	---	---	43.974	43.436	32.440	---	---	---	---	---	---	Stat (161d)
S5_B25_23	---	257,9	---	---	44.939	45.376	33.802	---	---	---	---	---	---	Stat (161d)
S5_B25_24	10	218	0,71	1.400	45.870	43.631	35.793	0,0016	6,220	0,533	0,680	---	---	
S5_B25_25	10	218	0,71	1.900	46.180	45.520	36.810	0,0021	4,938	0,514	0,684	---	---	
S5_B25_26	10	218	0,71	800	45.455	43.927	35.360	0,0009	10,497	0,575	0,718	---	---	
S5_B25_27	---	288,4	---	---	43.597	44.200	---	---	---	---	---	---	---	Stat
S5_B25_28	---	291,1	---	---	44.653	45.271	---	---	---	---	---	---	---	Stat
S5_B25_29	---	300,6	---	---	44.950	44.598	---	---	---	---	---	---	---	
S5_B25_30	---	300,3	---	---	47.456	44.483	37.354	---	---	---	---	---	---	Stat (308d)
S5_B25_31	---	277,2	---	---	46.878	44.949	42.567	---	---	---	---	---	---	Stat (308d)
S6_B95_06	20	634	0,77	475.000	50.465	54.818	42.761	0,5497	0,008	---	---	---	---	-50°C / 85
S6_B95_07	---	---	---	---	51.693	54.296	41.641	0,0020	6,887	0,585	0,687	2,05	---	Stat
S6_B95_08	---	823	---	---	50.824	53.456	44.500	0,0086	0,716	0,675	0,782	---	---	Stat
S6_B95_09	---	810	---	---	50.605	53.548	---	---	---	---	---	---	---	Stat
S6_B95_10	10	634	0,78	2.500	50.495	54.218	44.575	0,0057	1,566	0,907	0,938	2,24	---	
S6_B95_11	10	634	0,78	2.500	51.418	52.423	43.754	0,0028	1,548	0,864	0,909	2,18	---	
S6_B95_12	10	613	0,75	7.500	49.727	52.999	43.416	---	---	---	---	---	---	
S6_B95_13	10	560	0,69	17.500	50.436	53.139	42.714	0,0202	0,221	0,798	0,878	2,02	---	
S6_B95_14	10	613	0,75	7.500	47.973	51.834	42.420	---	---	---	---	---	---	
S6_B95_15	10	613	0,75	2.500	49.092	51.777	41.800	---	---	---	---	---	---	
S6_B95_16	10	539	0,66	32.500	49.251	51.640	43.050	---	---	---	---	---	---	
S6_B95_17	10	539	0,66	27.500	49.062	52.444	42.600	---	---	---	---	---	---	
S6_B95_18	10	539	0,66	42.500	49.076	52.769	43.610	---	---	---	---	---	---	
S6_B95_19	10	539	0,66	30.000	50.076	52.675	44.695	---	---	---	---	---	---	
S6_B95_20	10	686	0,84	1.900	50.317	54.080	43.321	---	---	---	---	---	---	
S6_B95_21	10	686	0,84	1.600	50.641	53.103	43.269	---	---	---	---	---	---	
S6_B95_22	10	686	0,84	900	50.183	53.814	43.640	---	---	---	---	---	---	
S6_B95_24	---	---	---	---	---	---	43.681	0,0187	---	---	---	---	---	
S6_B95_29	---	788	---	---	51.517	53.577	---	---	---	---	---	---	---	Stat
S6_B95_30	---	817	---	---	50.989	53.526	---	---	---	---	---	---	---	Stat
S6_B95_31	---	830	---	---	50.745	53.735	---	---	---	---	---	---	---	Stat

Bezeichnung	f_n [Hz]	F_o bzw. F_{max} [kN]	$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$ [/]	N [/]	$E_{dyn,US,0}$ [MPa]	$E_{dyn,EnI,0}$ [MPa]	D_0 bzw. E_{stat} [MPa]	T_N [d]	\dot{D} [MPa·s ⁻¹]	$\frac{D_N}{D_0}$ [/]	$\frac{D_{n,w}}{D_0}$ [/]	ϵ_{ges} [%]	$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$ [MPa]	Bemerkung
S7_B25_01	---	270,9	---	---	45.327	44.185	---	---	---	---	---	---	---	Stat
S7_B25_02	---	271,5	---	---	45.167	43.779	---	---	---	---	---	---	---	Stat
S7_B25_03	---	268,4	---	---	46.247	43.673	---	---	---	---	---	---	---	Stat
S7_B25_04	10	---	0,75	600	45.117	43.246	33.670	0,0006	14,760	0,527	0,677	---	---	
S7_B25_05	10	---	0,75	1.100	45.339	44.789	34.120	0,0012	8,212	0,512	0,663	---	---	
S7_B25_06	10	---	0,75	600	45.351	43.224	32670	0,0006	15,178	0,460	0,665	---	---	
S7_B25_07	10	---	0,84	100	44.966	43.260	33.450	0,0001	---	0,431	---	---	---	
S7_B25_08	10	---	0,84	100	45.441	43.012	33.210	0,0001	---	0,614	---	---	---	
S7_B25_09	10	---	0,84	200	44.605	43.082	33.200	0,0002	---	0,515	0,669	---	---	
S7_B25_10	---	---	---	---	45.330	43.580	---	---	---	---	---	---	---	
S7_B25_30	---	205,7	---	---	42.365	40.011	27.759	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
S7_B25_31	---	216,2	---	---	42.370	40.193	29.416	---	---	---	---	---	---	Stat (28d)
S8_B45_01	---	399,1	---	---	47.405	46.502	---	---	---	---	---	---	---	Stat
S8_B45_02	---	407,2	---	---	47.198	47.049	---	---	---	---	---	---	---	Stat
S8_B45_03	---	388,2	---	---	47.919	46.643	---	---	---	---	---	---	---	Stat
S8_B45_04	10	---	0,84	300	47.726	47.564	36.150	0,0003	9,377	0,815	0,847	---	---	
S8_B45_05	10	---	0,84	500	47.709	47.127	35.470	0,0005	11,763	0,675	0,781	---	---	
S8_B45_06	10	---	0,84	400	48.026	47.612	35.700	0,0004	17,980	0,627	0,791	---	---	
S8_B45_07	10	---	0,75	1.000	47.827	47.065	35.190	0,0011	7,091	0,629	0,752	---	---	
S8_B45_08	10	---	0,75	1.000	46.338	46.737	35.040	0,0011	6,186	0,691	0,798	---	---	
S8_B45_09	10	---	0,75	900	46.370	46.896	35.540	0,0010	7,760	0,653	0,785	---	---	
S8_B45_10	---	---	---	---	47.289	47.148	---	---	---	---	---	---	---	
S8_B45_30	---	332	---	---	44.077	44.654	33.859	---	---	---	---	---	---	stat (28d)
S8_B45_31	---	331	---	---	43.803	43.783	33.218	---	---	---	---	---	---	stat (28d)

Bezeichnungen:

f_n	Beanspruchungsfrequenz
F_o	Belastungshöhe
F_{max}	Maximalkraft
σ_o	Beanspruchungshöhe
β_c	Druckfestigkeit
$\beta_{c,n}$	Restfestigkeit
N	Bruchlastspielzahl
T	Bruchlaststandzeit
$E_{dyn,US,0}$	Dynamischer E-Modul ermittelt mit Hilfe der Ultraschall-Laufzeitmessung
$E_{dyn,EnI,0}$	Dynamischer E-Modul ermittelt mit Hilfe der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung
D_0	Anfangs-Verformungsmodul
E_{stat}	statischer E-Modul
$E_{stat,n}$	statischer Rest-E-Modul
T_N	Lebensdauer
ϵ_{ges}	Gesamtverformung bis zum Versagen
\dot{D}	Zeitliche Änderung des Verformungsmoduls in Phase II
$\frac{D_N}{D_0}$	Versagens-Verformungsmodul bezogen auf den Anfangs-Verformungsmodul
$\frac{D_{n,w}}{D_0}$	Verformungsmodul am Wendepunkt der Ermüdungslinie bezogen auf den Anfangs-Verformungsmodul
$\frac{D_0 - D_{100}}{100}$	Verformungsmodulabfall nach 100 Schwingungen
$\frac{\sigma_o}{\beta_c}$	Beanspruchungshöhe bezogen auf die Druckfestigkeit

Anhang A8: Streuung der Ergebniswerte

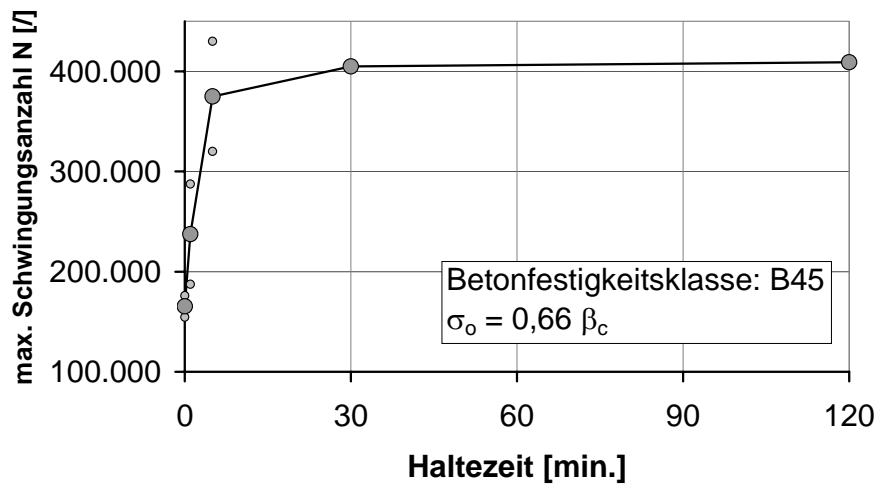


Abbildung 41: Einfluss der Ruhezeit auf die ertragbare Schwingungsanzahl

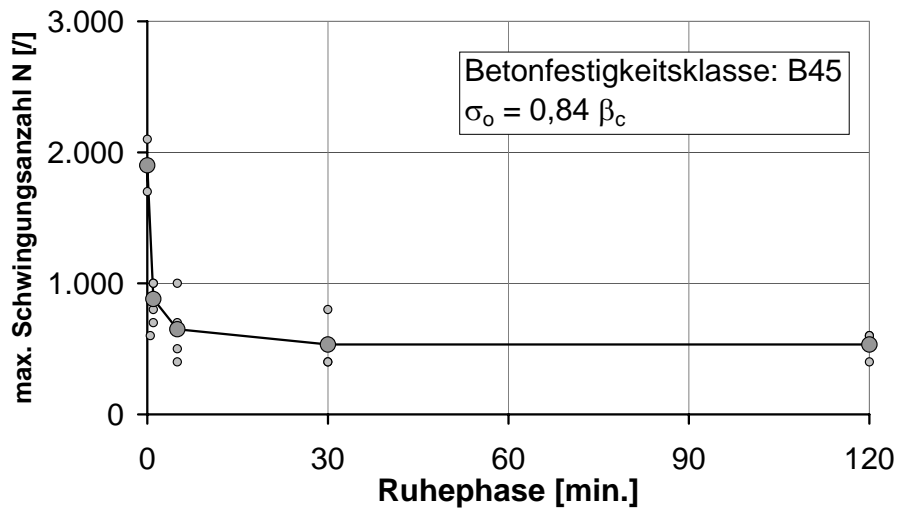


Abbildung 42: Einfluss der Ruhezeit zwischen den Schwingungen auf die ertragbare Schwingungsanzahl