

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Institut für Baustoffe und Konstruktion
Lehrstuhl für Massivbau

Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich

Birol Fitik

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Zimmermann
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr.-Ing. E.h. Konrad Zilch (i.R.)
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach,
Technische Universität Dresden
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer

Die Dissertation wurde am 24.01.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 20.02.2012 angenommen.

Kontakt (Hochschule):

Lehrstuhl für Massivbau
Institut für Baustoffe und Konstruktion
Technische Universität München
Theresienstraße 90, Gebäude N6
80333 München

Tel.: +49 (0) 89 289 23035

Fax: +49 (0) 89 289 23046

Kontakt (privat):

e-mail: fitik@gmx.de

Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich

Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich“ wurde am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München das Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) im Bereich baupraktisch relevanter Beanspruchungen untersucht. Das Forschungsvorhaben wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms SPP 1182 „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton“ gefördert.

In klassischen kraftgeregelten, einstufigen und einaxialen Wöhlerversuchen mit gleich bleibender sinusförmiger Lastaufbringung wurden die Auswirkungen der nach bisher vorliegenden Erkenntnissen dominanten Einflüsse (Spannungsschwingbreite und Mittelspannung, Faserzusatz, Faserorientierung sowie Wärmebehandlung) auf das Ermüdungsverhalten von UHPC untersucht. Ziel war die Festlegung von Wöhlerlinien auf Grundlage statistischer Auswertungen. Auf der Basis der Wöhlerlinien erfolgte die Ableitung von Grenzlinien für definierte Lastwechselzahlen in Form von Goodman-Diagrammen.

Die kraftgesteuerten Wöhlerversuche wurden an zentrisch belasteten UHPC-Körpern mit vorgegebenen Unter- und Oberspannungen unter Verzicht auf eine Beschränkung der Lastwechselzahl auf $2 \cdot 10^6$ (wie z.B. bei Ermüdungsversuchen mit Betonstahl üblich) durchgeführt.

Insbesondere wurde überprüft, inwiefern beigegebene Fasern den im Normalfall deutlich beschleunigten instabilen Rissfortschritt wirksam verzögern können. Mit der Geschwindigkeit des instabilen Rissfortschrittes eng verknüpft ist die Frage der Versagensankündigung im Hinblick auf ein Ermüdungsversagen des Betons.

Die vorliegenden, auf experimentellem und theoretischem Wege gewonnenen Erfahrungen sowohl zum Ermüdungsverhalten von Baustoffen und Bauteilen, als auch zur Ermittlung von Betonkennwerten in Verbindung mit der Umsetzung in ein Bemessungskonzept sind Bestandteile dieser Arbeit.

Fatigue behaviour of Ultra High Performance Concrete (UHPC) under alternating tensile and compressive loading

Abstract

As part of the research project on the "Fatigue behaviour of ultra-high performance concrete (UHPC) under cyclic stress reversal loading" the fatigue effects on these types of concrete under load ranges relevant to construction-related projects were tested at the Department of Concrete Structures of the Technische Universität München. The research project was funded by the German Research Foundation as a part of the priority program "Sustainable Building with Ultra High Performance Concrete".

Using classic, force-controlled, single-level and uniaxial S-N-tests with identical sinusoidal load application the effects of the dominant parameters (stress range and mean stress, fiber composition and orientation as well as heat treatment) known so far to have a certain influence on the fatigue behaviour of UHPC were investigated. The goal was to define S-N-curves on the basis of statistic evaluations. From the S-N-curves then followed the deduction of limit lines for defined numbers of load cycles in the form of Goodman diagrams.

Force-controlled S-N-tests were performed on axially loaded UHPC specimen with pre-defined upper and lower stress limit while the number of load cycles was not limited to $2 \cdot 10^6$.

It was especially examined in what way the added fibers could slow down accelerated instable crack propagation. The velocity of instable crack propagation is tightly linked to the question of predictability with regard to concrete fatigue failure.

The empirically and theoretically gained findings regarding to the fatigue behaviour of materials and structural members as well as in determining the concrete's characteristic values in relation to the application of a design concept are part of this research.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr.-Ing. E.h. Konrad Zilch (i.R.) gilt mein besonderer Dank für sein Vertrauen, seine Unterstützung und das Ermöglichen dieser Arbeit. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer möchte ich für das Interesse und die bereitwillige Übernahme der Koreferate danken. Dem Prüfungsvorsitzenden, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Zimmermann, sei an dieser Stelle ebenfalls gedankt.

Des Weiteren gilt mein Dank allen Kollegen des Lehrstuhls für Massivbau und den Mitarbeitern des Materialprüfungsamtes für das Bauwesen der Technischen Universität München für das stets freundschaftliche Zusammenarbeiten und das tolle Arbeitsklima. Meinen Kollegen Dipl.-Ing. (FH) Florian Dier M.Sc. und Dipl.-Ing. Christian Mühlbauer danke ich besonders für die Durchsicht der Arbeit und ihre Anmerkungen. Für das Mitwirken bei der Erarbeitung der Diagramme und Bilder möchte ich mich bei meinen beiden Hilfskräften Dipl.-Ing. (Arch.) Elke Hartmannsgruber und Calin Remus Tecusan M.Sc. bedanken.

Ich danke meinen Eltern und Geschwistern ohne deren Einwirken und Unterstützung die beiden Abschlüsse an der Fachhochschule und der Universität nicht möglich gewesen wären. Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Ferhan, die mich während der ganzen Zeit mit ihrer lebenswerten und wundervollen Art unterstützt und zur Seite gestanden hat.

München, Februar 2012

Birol Fitik

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Zimmermann
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr.-Ing. E.h. Konrad Zilch (i.R.)
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach,
Technische Universität Dresden
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer

Die Dissertation wurde am 24.01.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 20.02.2012 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Ziel und Umfang der Arbeit.....	1
2	Stand der Kenntnisse.....	3
2.1	Allgemeines.....	3
2.2	Grundlagen und Problematik von Konstruktionen aus ultrahochfestem Beton (UHPC).....	3
2.3	Auswirkungen zyklischer Beanspruchungen auf Normalbeton	6
2.3.1	Allgemeines	6
2.3.2	Versagensmechanismen und Beschreibung der Ermüdungsfestigkeit	7
2.3.3	Experimentelle Ansätze für Zugschwell- und Wechselbeanspruchung	8
2.3.4	Bisherige Ermüdungsversuche und Ergebnisse unter Zugschwell- und Wechselbeanspruchungen	9
2.4	Zyklische Beanspruchung von hochfestem Beton und Stahlfaserbeton	11
2.4.1	Hochfester Beton (HSC).....	11
2.4.2	Faserbeton (FRC).....	12
2.5	Zyklische Beanspruchung bei ultrahochfestem Beton.....	12
2.6	Schadensakkumulationsmodelle	13
2.7	Vorarbeiten an der Technischen Universität München.....	14
3	Versuchsprogramm.....	16
3.1	Allgemeines.....	16
3.2	Konzeption der Versuchsserien für die feinkörnige UHPC-Mischung M2Q bzw. M3Q	17
3.3	Konzeption der Versuchsserie für die grobkörnige UHPC-Mischung B5Q...21	21
4	Prüfkörper.....	23
4.1	Zusammensetzung des ultrahochfesten Betons.....	23
4.2	Geometrie der Prüfkörper	24
4.3	Herstellung und Lagerung der Prüfkörper	26
5	Statische Versuche.....	29
5.1	Druckfestigkeit des ultrahochfesten Betons	29
5.1.1	Festigkeitsentwicklung des ultrahochfesten Betons	29
5.1.2	Umrechnungsbeiwerte des ultrahochfesten Betons für verschiedene Prüfkörperabmessungen	30
5.1.2.1	Allgemeines	30
5.1.2.2	Umrechnungsbeiwerte für M3Q mSF oWB	31
5.1.2.3	Umrechnungsbeiwerte für M3Q mSF mWB	32
5.1.2.4	Umrechnungsbeiwerte für B5Q mSF oWB	32
5.1.2.5	Umrechnungsbeiwerte für B5Q mSF mWB	33
5.1.3	Umrechnungsbeiwerte für die knochenförmigen UHPC-Körper.....	34
5.2	E-Modul des ultrahochfesten Betons	35

5.3	Zugfestigkeit des ultrahochfesten Betons	37
5.4	Biegezugfestigkeit des ultrahochfesten Betons.....	38
5.5	Umrechnung der Zugfestigkeit für die knochenförmige UHPC-Körper	43
5.6	Umrechnung der Festigkeiten für die dynamischen Versuche.....	46
6	Versuchs- und Messeinrichtung	48
7	Ermüdungsversuche	51
7.1	Wöhlerlinien	51
7.1.1	Allgemeines	51
7.1.2	Einflussfaktoren	54
7.1.2.1	Allgemeines	54
7.1.2.2	Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit	55
7.1.2.3	Größe des konstant gehaltenen Beanspruchungswertes	56
7.1.2.4	Belastungsfrequenz	56
7.1.2.5	Einflüsse aus Temperatur	57
7.1.2.6	Schwinden, Kriechen und Dauerstandverhalten.....	57
7.1.2.7	Luftporengehalt.....	58
7.1.3	Regressionsanalyse	59
7.1.4	Ermüdungsversuche am feinkörnigen UHPC (M2Q bzw. M3Q).....	61
7.1.4.1	Hauptversuche M2Q/M3Q mSF mWB (Serie HV bzw. MHV)....	61
7.1.4.2	Einfluss des konstant gehaltenen Beanspruchungswertes	64
7.1.4.3	Einfluss der Stahlfasern (M2Q oSF mWB, Serie OF).....	64
7.1.4.4	Einfluss der Wärmebehandlung (M2Q mSF oWB, Serie WB)....	65
7.1.4.5	Einfluss der Faserorientierung (M2Q mSF mWB, Serie FO).....	66
7.1.4.6	Einfluss des Luftporengehaltes.....	68
7.1.4.7	Einfluss der Belastungsfrequenz	68
7.1.5	Ermüdungsversuche am grobkörnigen UHPC (B5Q).....	69
7.1.5.1	Hauptversuche B5Q mSF mWB (Serie BHV).....	69
7.1.5.2	Einfluss der Betonzusammensetzung	71
7.2	Dauerfestigkeitsschaubild nach Goodman.....	71
7.3	Versagensmodell bei Wechselbelastung	74
7.4	Bruchbild bei Ermüdungsversuchen unter Zugschwell- und Druck-Zug- Wechselbelastung	78
7.5	Verformungsverhalten und Schädigungsverlauf	81
7.5.1	Allgemeines	81
7.5.2	Schädigungsverlauf des feinkörnigen UHPC (M2Q/M3Q).....	83
7.5.3	Schädigungsverlauf des grobkörnigen UHPC (B5Q).....	85
7.5.4	Zusammenfassung Schädigungsverlauf.....	87
8	Bemessungsmodell.....	88
8.1	Nachweis der Ermüdung für Normalbeton.....	88
8.2	Nachweis der Ermüdung für ultrahochfesten Beton.....	91
8.2.1	Allgemeines	91
8.2.2	Bemessungswert der Betonzugfestigkeit unter wiederholter Belastung...	91
8.2.3	Bemessungskonzept	92
9	Ermüdungsverhalten von Leichtbeton	96

9.1	Allgemeines	96
9.2	Literaturdurchsicht Ermüdungsverhalten	96
9.2.1	Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau	96
9.2.2	Ermüdung von Betonkonstruktionen.....	97
9.2.3	Ermüdungseigenschaften des Leichtbetons.....	97
9.2.4	Dauerschwell- und Betriebsfestigkeit von Konstruktions-Leichtbeton	97
9.2.5	Festigkeit und Schädigung von Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung.....	98
9.2.6	Ermüdungsfestigkeit von Normal- und Leichtbeton	98
9.2.7	Ermüdung von Normal- und Leichtbeton	98
9.3	Vergleich der Versuchsergebnisse	98
9.4	Zusammenfassung Leichtbeton	101
10	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	102
11	Literatur	104
12	Anlagen	111
12.1	Ergebnisse der Druckversuche für die Festigkeitsentwicklung	111
12.2	Ergebnisse der statischen Versuche (Druckfestigkeiten, Zugfestigkeiten und Biegezugfestigkeiten) für alle Mischungen	113
12.2.1	M2Q oSF mWB (Serie OF).....	113
12.2.2	M2Q mSF oWB (Serie WB).....	114
12.2.3	M2Q mSF mWB (Serie HV).....	115
12.2.4	M3Q mSF oWB.....	117
12.2.5	M3Q mSF mWB (Serie MHV).....	118
12.2.6	B5Q mSF oWB	121
12.2.7	B5Q mSF mWB (Serie BHV).....	122
12.3	Last-Verformungs-Kurven einiger Zugversuche	124
12.3.1	Last-Verformungs-Kurven für die Serie M2Q oSF mWB (OF).....	124
12.3.2	Last-Verformungs-Kurve für die Serie M2Q mSF oWB (WB).....	125
12.3.3	Last-Verformungs-Kurven für die Serie M2Q mSF mWB (HV).....	126
12.3.4	Last-Verformungs-Kurve für die Serie M3Q mSF oWB	127
12.3.5	Last-Verformungs-Kurven für die Serie M3Q mSF mWB (MHV).....	128
12.3.6	Last-Verformungs-Kurve für die Serie B5Q mSF oWB.....	129
12.3.7	Last-Verformungs-Kurven für die Serie B5Q mSF mWB (BHV).....	130
12.4	Übersicht der Ermüdungsversuchsergebnisse	131
12.4.1	M2Q oSF mWB (Serie OF).....	131
12.4.2	M2Q mSF oWB (Serie WB).....	132
12.4.3	M2Q mSF mWB (Serie FO).....	133
12.4.4	M2Q mSF mWB (Serie HV).....	134
12.4.5	M3Q mSF mWB (Serie MHV).....	136
12.4.6	B5Q mSF mWB (Serie BHV).....	138
12.5	Wöhlerlinien aller Versuchsserien	140
12.5.1	Wöhlerlinien für die Serie M2Q oSF mWB (OF)	140
12.5.2	Wöhlerlinien für die Serie M2Q mSF oWB (WB)	141
12.5.3	Wöhlerlinien für die Serie M2Q mSF mWB (FO).....	143
12.5.4	Wöhlerlinien für die Serie M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV)	144

12.5.5	Wöhlerlinien für die Serie B5Q mSF mWB (BHV)	147
12.6	Ergebnisse der statistischen Auswertung der Ermüdungsversuche.....	150
12.7	Statistische Auswertung der Ermüdungsversuche in Abhängigkeit des Luftporengehaltes	153
12.8	Schädigungsverläufe	154
12.8.1	Schädigungsverläufe für die Serie M3Q mSF mWB (MHV)	154
12.8.2	Schädigungsverläufe für die Serie B5Q mSF mWB (BHV)	157

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Übersicht über die durchgeführten Versuche mit zyklischer Zugursprungs- und Wechselbeanspruchung in der 1. und 2. Förderperiode (M2Q und M3Q)	20
Tabelle 3.2:	Übersicht über die durchgeführten Versuche mit zyklischer Wechselbeanspruchung in der 2. Förderperiode (B5Q).....	22
Tabelle 4.1:	Mischungszusammensetzung für die Rezeptur M2Q, M3Q und B5Q (in kg/m ³)	23
Tabelle 5.1:	Bisherige Umrechnungsbeiwerte (aus Hegger et al. 1999).....	30
Tabelle 5.2:	Druckfestigkeiten und Standardabweichungen für die Serie M3Q mSF oWB (in MPa)	31
Tabelle 5.3:	Umrechnungsbeiwerte für M3Q mSF oWB	31
Tabelle 5.4:	Druckfestigkeiten und Standardabweichungen für die Serie M3Q mSF mWB (in MPa)	32
Tabelle 5.5:	Umrechnungsbeiwerte für M3Q mSF mWB	32
Tabelle 5.6:	Druckfestigkeiten und Standardabweichungen für die Serie B5Q mSF oWB (in MPa)	33
Tabelle 5.7:	Umrechnungsbeiwerte für B5Q mSF oWB	33
Tabelle 5.8:	Druckfestigkeiten und Standardabweichungen für die Serie B5Q mSF mWB (in MPa)	34
Tabelle 5.9:	Umrechnungsbeiwerte für B5Q mSF mWB	34
Tabelle 5.10:	Ergebnisse der E-Modulbestimmung während der ersten und der zweiten Förderperiode für die Serien M2Q, M3Q und B5Q	36
Tabelle 5.11:	Ergebnisse der Biegezugfestigkeiten während der ersten und der zweiten Förderperiode	41
Tabelle 5.12:	Ergebnisse der Biegezugfestigkeiten während des Ringversuches.....	42
Tabelle 5.13:	Ergebnisse der zentrischen Zugfestigkeiten während der ersten und der zweiten Förderperiode	45
Tabelle 5.14:	Formfaktoren k_1 und k_2 zur Ermittlung der zentrischen Zugfestigkeit der großen knochenförmigen UHPC-Körper	46
Tabelle 7.1:	Wertetabelle bei der Berechnung der Regressionsgeraden (aus Wilrich, Henning 1998)	60
Tabelle 12.1:	Ergebnisse der Druckversuche an Würfel (a = 100 mm) für die Festigkeitsentwicklung der Mischungen M2Q, M3Q und B5Q	111
Tabelle 12.2:	Ergebnisse der statischen Versuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q oSF mWB (Serie OF)	113
Tabelle 12.3:	Ergebnisse der statischen Versuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q mSF oWB (Serie WB).....	114
Tabelle 12.4:	Ergebnisse der statischen Versuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q mSF mWB (Serie HV)	115
Tabelle 12.5:	Ergebnisse der statischen Versuche während der zweiten Förderperiode für die Mischung M3Q mSF oWB	117
Tabelle 12.6:	Ergebnisse der statischen Versuche während der zweiten Förderperiode für die Mischung M3Q mSF mWB (Serie MHV)	118
Tabelle 12.7:	Ergebnisse der statischen Versuche während der zweiten Förderperiode für die Mischung B5Q mSF oWB	121
Tabelle 12.8:	Ergebnisse der statischen Versuche während der zweiten Förderperiode für die Mischung B5Q mSF mWB (Serie BHV).....	122
Tabelle 12.9:	Ergebnisse der Ermüdungsversuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q oSF mWB (Serie OF)	131
Tabelle 12.10:	Ergebnisse der Ermüdungsversuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q mSF oWB (Serie WB).....	132
Tabelle 12.11:	Ergebnisse der Ermüdungsversuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q mSF mWB (Serie FO)	133
Tabelle 12.12:	Ergebnisse der Ermüdungsversuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q mSF mWB (Serie HV)	134

Tabelle 12.13: Ergebnisse der Ermüdungsversuche während der zweiten Förderperiode für die Mischung M3Q mSF mWB (Serie MHV)	136
Tabelle 12.14: Ergebnisse der Ermüdungsversuche während der zweiten Förderperiode für die Mischung B5Q mSF mWB (Serie BHV).....	138
Tabelle 12.15: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Ermüdungsversuche	150
Tabelle 12.16: Ergebnisse der Ermüdungsversuche in Abhängigkeit des Luftporengehaltes	153

Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1:	Brückenelement aus ultrahochfestem Beton mit vorgespannten Zugstäben (aus Reichel 2004).....	4
Bild 2.2:	Tragverhalten eines vorgespannten Zuggliedes aus UHPC mit Fasern	5
Bild 2.3:	Beanspruchungsfälle beim Dauerschwingversuch (aus Kessler-Kramer 2002)	6
Bild 2.4:	Mittlere Verformungen von gekerbten Zugprismen in Wöhlerversuchen mit zunehmender Lastspielzahl für verschiedene Belastungsgrade (links) und verschiedene Betongüten, Prüffrequenzen bzw. Nachbehandlungsarten (rechts) (aus Kessler-Kramer 2002).....	7
Bild 2.5:	Zentrisch beanspruchte Versuchskörper zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens bei Wechselbeanspruchung (NSC und HSC) sowie Versuchskörper für statische Zugversuche (UHPC).....	10
Bild 2.6:	Goodman-Diagramm für zyklisch beanspruchten Normalbeton. Ergebnisse für den Normalbeton nach (Cornelissen, Reinhardt 1984) bzw. (DAfStb 1987).....	11
Bild 3.1:	Untersuchte Kombinationen (σ_u , σ_o) der 1. Förderperiode (M2Q).....	19
Bild 3.2:	Untersuchte Kombinationen (σ_u , σ_o) der 1. und 2. Förderperiode (M2Q und M3Q).....	20
Bild 3.3:	Untersuchte Kombinationen (σ_u , σ_o) der 2. Förderperiode (B5Q)	21
Bild 4.1:	Zusammenstellung der Prüfkörperformen von einigen bisher durchgeführten Zugversuchen aus Beton (Maße in mm)	24
Bild 4.2:	a) Versuchskörper für Wöhlerversuche bei Wechselbeanspruchung (Antragsphase) b) Geänderte Prüfkörperabmessungen (Erste Förderperiode) (Maße in mm)	25
Bild 4.3:	Versuchskörper für Wöhlerversuche bei Wechselbeanspruchung während der zweiten Förderperiode (Maße in mm).....	25
Bild 4.4:	Übersicht der Ergebnisse aus den Finite-Element-Berechnungen	26
Bild 4.5:	Schalung der Prüfkörper während der ersten Förderperiode aus dem Kunststoff POM27	
Bild 4.6:	Schalung der Prüfkörper während der zweiten Förderperiode aus dem Kunststoff POM	27
Bild 5.1:	Festigkeitsentwicklung des UHPC (Mischung M2Q, M3Q und B5Q).....	29
Bild 5.2:	Ergebnisse der E-Modul-Versuche des UHPC (Mischung M3Q und B5Q).....	37
Bild 5.3:	Mittlere Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des UHPC (Mischung M3Q und B5Q).....	38
Bild 5.4:	Belastungsanordnung zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Maße in mm) (aus DIN EN 196-1:2005-05-00).....	39
Bild 5.5:	Mittlere Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des UHPC (Mischung M2Q, M3Q und B5Q)	40
Bild 5.6:	Belastungsanordnung zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Maße in mm) (aus DAfStb 2009)	41
Bild 5.7:	Last-Durchbiegungs-Beziehung zur Ermittlung der Nachrissbiegezugfestigkeiten (aus DAfStb 2009)	42
Bild 5.8:	Last-Durchbiegungs-Beziehung des UHPC (Mischung M3Q mSF oWB).....	43
Bild 5.9:	Last-Durchbiegungs-Beziehung des UHPC (Mischung B5Q mSF oWB).....	43
Bild 5.10:	Versuchseinrichtung für den zentrischen Zugversuch an UHPC-Körpern	44
Bild 5.11:	Prüfkörperabmessungen und Versuchseinrichtung der kleinen knochenförmigen UHPC-Körper (Maße in mm).....	45
Bild 6.1:	Prüfkörperabmessungen (in mm) und Einbau in Prüfmaschine (schematisch)	48
Bild 6.2:	UHPC-Körper mit Wegaufnehmern und Temperaturfühler während der ersten und zweiten Förderperiode	49
Bild 7.1:	Wöhlerlinie am Beispiel metallischer Werkstoffe (schematisch) (aus Zilch, Zehetmaier 2010).....	51
Bild 7.2:	Wöhlerlinie am Beispiel Beton (schematisch) (aus Kessler-Kramer 2002).....	52

Bild 7.3:	Wöhlerlinie von Beton unter einaxialer Druckschwellbeanspruchung (aus Klausen 1978).....	53
Bild 7.4:	Wöhlerlinien bei Zugschwell- und Druck-Zug-Wechselbeanspruchung (aus Cornelissen 1984).....	53
Bild 7.5:	Wöhlerlinien verschiedener Überlebenswahrscheinlichkeiten bei einer konstanten Unterspannung (aus Kessler-Kramer 2002).....	54
Bild 7.6:	Erreichte Lastwechsel in Abhängigkeit der Prüfkörperhöhe (Serie A250, A450 und A600 aus Tecusan 2009).....	55
Bild 7.7:	Wöhlerlinien für Normal- und Luftporenbeton im Druckschwellbereich (aus de Antrim, McLaughlin 1959).....	58
Bild 7.8:	Regressionsgerade bei der Anwendung der einfachen linearen Regression (aus Wilrich, Henning 1998).....	59
Bild 7.9:	Wöhlerlinien des UHPC (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$).....	63
Bild 7.10:	Modifizierte Wöhlerlinien des UHPC (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$).....	63
Bild 7.11:	Wöhlerlinien des UHPC (M2Q oSF mWB (OF), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$).....	65
Bild 7.12:	Wöhlerlinien des UHPC (M2Q mSF oWB (WB), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$).....	66
Bild 7.13:	Wöhlerlinien des UHPC (M2Q mSF mWB (FO), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$).....	67
Bild 7.14:	Wöhlerlinien des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$).....	69
Bild 7.15:	Modifizierte Wöhlerlinien des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$).....	70
Bild 7.16:	Wöhlerlinien des UHPC (Vergleich zwischen M2Q/M3Q und B5Q).....	71
Bild 7.17:	Goodman-Diagramm für zyklisch beanspruchten Normalbeton. Ergebnisse für den Normalbeton nach (Cornelissen, Reinhardt 1984) bzw. (DAFStb 1987).....	72
Bild 7.18:	Goodman-Diagramm für den feinkörnigen UHPC M2Q bzw. M3Q (Normalbeton nach (Cornelissen, Reinhardt 1984) bzw. (DAFStb 1987)).....	73
Bild 7.19:	Goodman-Diagramm für den feinkörnigen UHPC M2Q bzw. M3Q (Normalbeton nach (Cornelissen, Reinhardt 1984) bzw. (DAFStb 1987)).....	74
Bild 7.20:	Spannungsverteilung bei Wechselbelastung von Normalbeton unter Berücksichtigung einer fortgeschrittenen Mikrorissbildung (aus Rings 1986).....	76
Bild 7.21:	Zugbeanspruchung der Matrix bei äußerer Zug- und Druckbelastung (aus Rings 1986).....	77
Bild 7.22:	Wöhlerlinien für Druckschwell- und Zugschwellbelastung (aus Rings 1986).....	78
Bild 7.23:	Druckversagen eines Prüfkörpers (BHV_A7_04, N = 932.062).....	79
Bild 7.24:	Zugversagen eines Prüfkörpers (MHV_D0_02, N = 44.886).....	80
Bild 7.25:	Zugversagen eines Prüfkörpers (BHV).....	81
Bild 7.26:	Qualitative Beschreibung des Schädigungsverlaufs von Normalbeton (NSC), hochfestem Beton (HSC) und ultrahochfestem Beton (UHPC).....	82
Bild 7.27:	Schädigungsverlauf von Normalbeton (NSC) und hochfestem Beton (HSC).....	83
Bild 7.28:	Schädigungsverlauf des UHPC (M3Q mSF mWB (MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)... 84	
Bild 7.29:	Schädigungsverläufe des UHPC, M3Q mSF mWB (MHV).....	85
Bild 7.30:	Schädigungsverläufe des UHPC, B5Q mSF mWB (BHV).....	87
Bild 8.1:	Wöhlerlinien des Normalbetons unter Druck- bzw. Zugbeanspruchung nach (fib 2010).....	90
Bild 8.2:	Modifizierte Wöhlerlinien des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$).....	93
Bild 8.3:	Wöhlerlinien des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$; $\sigma_c/f_{cm} = -0,5$ bzw. $\sigma_c/f_{cm} = -0,3$).....	93
Bild 8.4:	Vergleich der Bemessungsvorschläge (teilweise aus (Wefer 2010) und (fib 2010)).....	94
Bild 9.1:	Spektrum der konstruktiven Leichtbetone (aus Faust 2003).....	96

Bild 9.2:	Übersicht der bisherigen Ergebnisse aus früheren Versuchen	99
Bild 9.3:	Wöhlerlinien für Versuche mit einer Unterspannung von $\sigma_u = 0,05 \cdot f_c$	100
Bild 9.4:	Wöhlerlinien für Versuche mit einer Unterspannung von $\sigma_u = 0,20 \cdot f_c$	100
Bild 9.5:	Wöhlerlinien für Versuche mit einer Unterspannung von $\sigma_u = 0,40 \cdot f_c$	101
Bild 12.1:	Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M2Q oSF mWB, kleine Knochen)	124
Bild 12.2:	Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M2Q oSF mWB, große Knochen)	124
Bild 12.3:	Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M2Q mSF oWB, kleine Knochen)	125
Bild 12.4:	Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M2Q mSF mWB, kleine Knochen)	126
Bild 12.5:	Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M2Q mSF mWB, große Knochen)	126
Bild 12.6:	Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M3Q mSF oWB, kleine Knochen)	127
Bild 12.7:	Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M3Q mSF mWB, kleine Knochen)	128
Bild 12.8:	Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M3Q mSF mWB, große Knochen)	128
Bild 12.9:	Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung B5Q mSF oWB, kleine Knochen)	129
Bild 12.10:	Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung B5Q mSF mWB, kleine Knochen)	130
Bild 12.11:	Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung B5Q mSF mWB, große Knochen)	130
Bild 12.12:	Wöhlerlinien des UHPC (M2Q oSF mWB (OF), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$).....	140
Bild 12.13:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q oSF mWB (OF), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$)	140
Bild 12.14:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q oSF mWB (OF), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)	141
Bild 12.15:	Wöhlerlinien des UHPC (M2Q mSF oWB (WB), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$).....	141
Bild 12.16:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q mSF oWB (WB), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$)	142
Bild 12.17:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q mSF oWB (WB), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)	142
Bild 12.18:	Wöhlerlinien des UHPC (M2Q mSF mWB (FO), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$).....	143
Bild 12.19:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q mSF mWB (FO), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$)	143
Bild 12.20:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q mSF mWB (FO), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)	144
Bild 12.21:	Wöhlerlinien des UHPC (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$).....	144
Bild 12.22:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$).....	145
Bild 12.23:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$).....	145
Bild 12.24:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$).....	146
Bild 12.25:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$).....	146
Bild 12.26:	Wöhlerlinien des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$).....	147

Bild 12.27:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$)	147
Bild 12.28:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$)	148
Bild 12.29:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)	148
Bild 12.30:	Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$)	149
Bild 12.31:	Schädigungsverlauf des UHPC (M3Q mSF mWB (MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)..	154
Bild 12.32:	Schädigungsverlauf des UHPC (M3Q mSF mWB (MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,2$)..	154
Bild 12.33:	Schädigungsverlauf des UHPC (M3Q mSF mWB (MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)..	155
Bild 12.34:	Schädigungsverlauf des UHPC (M3Q mSF mWB (MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{cm} = 0,0$)..	155
Bild 12.35:	Schädigungsverlauf des UHPC (M3Q mSF mWB (MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,1$)..	156
Bild 12.36:	Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,3$)..	157
Bild 12.37:	Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,5$)..	157
Bild 12.38:	Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)..	158
Bild 12.39:	Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,5$)..	158
Bild 12.40:	Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)..	159
Bild 12.41:	Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,3$)..	159
Bild 12.42:	Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,5$)..	160
Bild 12.43:	Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)..	160
Bild 12.44:	Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,5$)..	161
Bild 12.45:	Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)..	161

Verwendete Zeichen und Einheiten

Im Folgenden werden die wichtigsten in dieser Arbeit verwendeten Zeichen und Einheiten aufgeführt:

Abkürzungen und Sonderzeichen

B5Q	Grobkörnige ultrahochfeste Betonmischung
BHV	Hauptversuche B5Q (2. Förderperiode)
FO	Begleitende Versuchsserie (1. Förderperiode)
FRC	Fiber Reinforced Concrete (dt.: Faserbeton)
HSC	High Strength Concrete (dt.: Hochfester Beton)
HPLWAC	High Performance Lightweight Aggregate Concrete (dt.: Hochleistungsleichtbeton)
HSLWAC	High Strength Lightweight Aggregate Concrete (dt.: Hochfester Leichtbeton)
HV	Hauptversuche M2Q (1. Förderperiode)
LC	Lightweight Concrete (dt.: Leichtbeton)
LP	Luftporen
LW	Lastwechsel
M2Q	Feinkörnige ultrahochfeste Betonmischung (1. Förderperiode)
M3Q	Feinkörnige ultrahochfeste Betonmischung mit anderem Mikrosilika (2. Förderperiode)
mSF	Mit Stahlfasern
mWB	Mit Wärmebehandlung
MHV	Hauptversuche M3Q (2. Förderperiode)
NSC	Normal Strength Concrete (dt.: Normalfester Beton)
OF	Begleitende Versuchsserie (1. Förderperiode)
oSF	Ohne Stahlfasern
oWB	Ohne Wärmebehandlung
RH	Relative Humidity (dt.: relative Luftfeuchtigkeit)
UHPC	Ultra High Performance Concrete (dt.: Ultrahochfester Beton)
WB	Begleitende Versuchsserie (1. Förderperiode)

Große lateinische Buchstaben

B	Bestimmtheitsmaß
F	Last
N	Last; Lastwechsel
P	Wahrscheinlichkeit
R	Spannungsverhältnis
S	Spannungsschwingbreite; Belastungsgrad

Y Zielgröße

Kleine lateinische Buchstaben

a Länge; Beiwert
b Breite; Beiwert
c Beiwert
d Durchmesser; Tage; Beiwert
e Beiwert
f Frequenz; Belastungsfrequenz; Prüffrequenz; Festigkeit
h Höhe; Stunden
k Faktor; Beiwert
l Stützweite
m Potenz
n Tatsächliche Anzahl der Schwingspiele; Anzahl Versuche
s Standardabweichung; Verformung
t Zeit; Dicke
v Variationskoeffizient
x Einflussgröße
 \bar{x} Mittelwert
 \bar{y} Mittelwert

Griechische Buchstaben

α Beiwert
 β Festigkeit
 δ Verformung
 ε Dehnung (Differenz der Dehnung aus Ober- und Unterspannung)
 Δ Differenz
 \emptyset Durchmesser
 ρ Dichte
 σ Spannung; Standardabweichung
 μ Regression; Mittelwert

Indizes

7d 7 Tage
28d 28 Tage
90d 90 Tage
blk Balken
c Druckbeanspruchung; Beton
cal Kalkuliert

cm	Mittlere Druckbeanspruchung
cr	Riss
ct	Zugbeanspruchung
ctm	Mittlere Zugbeanspruchung
cu	Würfel
cyl	Zylinder
Deko	Dekompression
fat	Ermüdung
fl	Biegezug
gK	große Knochen
kK	kleine Knochen
m	Mittel
max	Maximum
min	Minimum
mitte	Mitte
o	Oben
perm	Dauer
pr	Prisma
q	Verkehr
tat	Tatsächlich
u	Unten
ü	Überleben
v	Versagen

Große lateinische Buchstaben mit Indizes

D_{Ed}	Bemessungswert der Schädigung
E_{c0m}	Elastizitätsmodul des Betons als Tangente im Ursprung der Spannungs-Dehnungslinie nach 28 Tagen
E_{ci}	Mittelwert des Elastizitätsmodul des Betons nach (fib 2010)
E_{cm}	Mittelwert des Elastizitätsmodul des Betons
$E_{c0m,neu}$	Vorgeschlagener neuer Elastizitätsmodul des Betons nach 28 Tagen
F_{max}	Maximale Zugkraft
N_u	Bruchlast
N_{cr}	Risslast
N_{Deko}	Last bei Dekompression
N_{perm}	Dauerlast
N_q	Verkehrslast
$P_{\ddot{u}}$	Überlebenswahrscheinlichkeit
P_v	Versagenswahrscheinlichkeit

Q_{xx}	Summe der quadrierten Abweichungen
Q_{xy}	Summe der quadrierten Abweichungen
Q_{yy}	Summe der quadrierten Abweichungen
$S_{c,max}$	Bezogene maximale Druckspannung
$S_{c,min}$	Bezogene minimale Druckspannung
$S_{ct,max}$	Bezogene maximale Zugspannung
$S_{ct,min}$	Bezogene minimale Zugspannung
S_x	Hilfssumme zur Berechnung der Regressionsgeraden
S_{xx}	Hilfssumme zur Berechnung der Regressionsgeraden
S_{xy}	Hilfssumme zur Berechnung der Regressionsgeraden
S_y	Hilfssumme zur Berechnung der Regressionsgeraden
S_{yy}	Hilfssumme zur Berechnung der Regressionsgeraden

Kleine lateinische Buchstaben mit Indizes

a_u	Untere Anteilsgrenze
a_o	Obere Anteilsgrenze
b_i	Beiwerte der Regressionsgeraden
f_c	Druckfestigkeit
$f_{c,cu100}$	Würfeldruckfestigkeit ($a = 100$ mm)
$f_{c,cu150}$	Würfeldruckfestigkeit ($a = 150$ mm)
$f_{c,cyl100}$	Zylinderdruckfestigkeit ($d/h = 100/200$ mm)
$f_{c,cyl150}$	Zylinderdruckfestigkeit ($d/h = 150/300$ mm)
$f_{c,pr40}$	Prismendruckfestigkeit ($a/a/l = 40/40/160$ mm)
$f_{cd,fat}$	Bemessungswert der Betondruckfestigkeit unter wiederholter Belastung
f_{ck}	Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit ($d/h = 150/300$ mm)
$f_{ck,fat}$	Charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit unter wiederholter Belastung
f_{cm}	Mittlere Druckfestigkeit
$f_{cm,cu100}$	Mittlere Würfeldruckfestigkeit ($a = 100$ mm)
$f_{cm,cu150}$	Mittlere Würfeldruckfestigkeit ($a = 150$ mm)
$f_{cm,cyl100}$	Mittlere Zylinderdruckfestigkeit ($d/h = 100/200$ mm)
$f_{cm,cyl150}$	Mittlere Zylinderdruckfestigkeit ($d/h = 150/300$ mm)
$f_{cm,pr40}$	Mittlere Prismendruckfestigkeit ($a/a/l = 40/40/160$ mm)
f_{ct}	Zugfestigkeit
$f_{ctd,fat}$	Bemessungswert der Betonzugfestigkeit unter wiederholter Belastung
$f_{ctk0,05}$	5%-Quantile der Betonzugfestigkeit
$f_{ctk,min}$	Minimale charakteristische Betonzugfestigkeit
f_{ctm}	Mittlere Zugfestigkeit
$f_{ctm,cal}$	Aus der Biegezugfestigkeit berechnete mittlere Zugfestigkeit
$f_{ctm,fl}$	Mittlere Biegezugfestigkeit

$f_{ctm,fl,cal}$	Kalkulierte mittlere Biegezugfestigkeit
$f_{ctm,gr}$	Mittlere Zugfestigkeit der großen knochenförmigen UHPC-Körper
$f_{ctm,kl}$	Mittlere Zugfestigkeit der kleinen knochenförmigen UHPC-Körper
k_{2u}	Beiwert
k_i	Formfaktoren
n_i	Beobachtungswerte
n_k	Anzahl der Beobachtungswerte
s^2	Restvarianz
s_x	Standardabweichung
s_x^2	Varianz
s_{xy}	Kovarianz
v_x	Variationskoeffizient
x_i	Wert der Variablen x
x_k	Wert der Variablen x
y_{iv}	Beobachtungswerte von Y
y_{kn}	Beobachtungswerte von Y

Griechische Buchstaben mit Indizes

α_E	Beiwert zur Berücksichtigung des Zuschlagkorns
α_{fl}	Beiwert zur Berechnung der Biegezugfestigkeit
β_c	Druckfestigkeit (frühere Bezeichnung)
$\beta_{cc}(t)$	Koeffizient
γ_c	Materialteilsicherheitsbeiwert des Betons
$\gamma_{c,fat}$	Materialteilsicherheitsbeiwert des Betons bei Ermüdung
γ_{Ed}	Teilsicherheitsbeiwert
ΔS_c	Bezogene Spannungsschwingbreite
$\Delta \sigma_i$	Spannungsschwingbreite
δ_q	Verformung infolge Verkehrslast
η_c	Faktor
μ_y	Regressionsgerade
ρ_m	Mittlere Festbetonrohddichte
σ_c	Betonspannung
$\sigma_{c,max}$	maximale Betondruckspannung
$\sigma_{c,min}$	minimale Betondruckspannung
$\sigma_{ct,max}$	maximale Betonzugspannung
$\sigma_{ct,min}$	minimale Betonzugspannung
σ_m	Mittlere Spannung
σ_{max}	Maximale Spannung
σ_{min}	Minimale Spannung

σ_{mitte}	Spannung in der Mitte
σ_o	Obere Spannung
σ_u	Untere Spannung

Einheiten

Dichte	kg/m ³ ; kg/dm ³
Fläche	mm ² , m ²
Frequenz	Hz
Last	kN
Länge	mm, m
Spannung	N/mm ² , MN/m ² , MPa
Temperatur	°C
Temperaturunterschied	K
Volumen	l
Zeit	sec, min, h, d

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Entwicklung von ultrahochfestem Beton (UHPC) ermöglicht die Ausführung von schlankeren Bauteilen und führt im Vergleich zu Bauteilen aus Normalbeton (NSC) zu einem deutlich verringerten Eigengewicht. Demzufolge treten bei wirtschaftlich ausgeführten Konstruktionen dynamische Beanspruchungen aus Verkehrslasten gegenüber den ruhenden Beanspruchungen immer mehr in den Vordergrund. Die im Vergleich zur hohen Druckfestigkeit nur geringe Zugfestigkeit von UHPC erfordert außerdem für ein breites Spektrum von Bauteilen (z.B. Zugstäbe, Fahrbahntafeln oder Masten) den Einsatz vorgespannter Konstruktionen. Deren besonders wirtschaftliche Auslegung hat zur Folge, dass im Betrieb durch Verkehrslasten zyklische Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich hervorgerufen werden. Bei Normalbeton führen Wechselbeanspruchungen zu einem gegenüber Schwellbeanspruchungen beschleunigten Schädigungsfortschritt und damit zu einer deutlich reduzierten Ermüdungsfestigkeit.

1.2 Ziel und Umfang der Arbeit

Systematische Untersuchungen zur Ermüdung insbesondere unter den, für Bauteile aus UHPC, relevanten Druck-Zug-Wechselbeanspruchungen liegen derzeit nicht vor. Es ist zu erwarten, dass eine Reihe der bisher untersuchten Eigenschaften von UHPC Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten bei zyklischer Beanspruchung aufweisen. Beigegebene Fasern bzw. Fasermaterial und -abmessung sowie Verteilung und Orientierung nehmen Einfluss auf die Ermüdungsschädigung. Durch den hohen Zementanteil und das dadurch ausgeprägte autogene Schwinden (vgl. Schachinger et al. 2002) weist die Oberfläche von UHPC-Bauteilen ggf. Defekte bis hin zu makroskopischen Rissen auf, deren Auswirkungen auf das Ermüdungsverhalten bisher ungeklärt sind. Das mit zunehmender Festigkeit bzw. Gefügehomoogenität verstärkte spröde Materialverhalten von Betonen wirkt sich zumindest auf die Geschwindigkeit des instabilen Rissfortschrittes aus. Inwieweit Auswirkungen auf Rissinitiierung und stabilen Fortschritt bestehen, wurde bisher nicht systematisch untersucht. Darüber hinaus liegen derzeit keine gesicherten Erkenntnisse zu den Auswirkungen einer Wärmebehandlung im Hinblick auf die Gefügedichtigkeit bzw. Festigkeit vor.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich“ wurde am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München das Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) im Bereich baupraktisch relevanter Beanspruchungen untersucht. Das Forschungsvorhaben wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms SPP 1182 „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton“ gefördert. Im Folgenden werden auch Auszüge aus dem Forschungsantrag verwendet.

In klassischen kraftgeregelten, einstufigen und einaxialen Wöhlerversuchen mit gleich bleibender sinusförmiger Lastaufbringung wurden die Auswirkungen der, nach bisher vorliegenden Erkenntnissen, dominanten bzw. zu erwartenden Einflüsse (Spannungsschwingbreite und Mittelspannung, Faserzusatz, Faserorientierung sowie Wärmebehandlung) auf das Ermüdungsverhalten von UHPC untersucht. Ziel war die Festlegung von Wöhlerlinien auf Grundlage statistischer Auswertungen. Auf der Grundlage der Wöhlerlinien soll die Ableitung von Grenzlinien für definierte Lastwechselzahlen in Form von Goodman-Diagrammen erfolgen.

Die kraftgesteuerten Wöhlerversuche wurden an zentrisch belasteten UHPC-Körpern mit vorgegebenen Unter- und Oberspannungen unter Verzicht auf eine Beschränkung der Last-

wechselzahl auf $2 \cdot 10^6$ (wie z.B. bei Ermüdungsversuchen am Betonstahl üblich) durchgeführt. Wöhlerversuche besitzen grundsätzlich nur für einstufige Kollektive unmittelbare Aussagekraft. Sie finden für baupraktische Aufgabenstellungen meist Anwendung unter Ansatz der linearen Schadensakkumulationshypothese von (Palmgren 1945) und (Miner 1945). Die Anwendbarkeit dieser Hypothese für Beton ist angesichts des bekannten Schädigungsverlaufs zwar umstritten, es sind aber keine geeigneten Alternativverfahren bekannt, so dass sie nach wie vor die Basis für die Abschätzung der Ermüdungsfestigkeit unter Betriebslasten bildet.

Einflüsse der zyklischen Beanspruchung auf die axiale Steifigkeit wurden durch eine hochfrequente Messung des Last-Längsverformungs-Verhaltens erfasst. Mit diesem Verfahren kann gleichwertig zu alternativen Messmethoden wie der Ultraschall-Laufzeitmessung oder der Schallemissionsanalyse der durch zyklische Wechselbelastung hervorgerufene Schädigungsfortschritt sichtbar gemacht werden. So können die Auswirkungen beigegebener Fasern oder einer Wärmebehandlung auf die Schädigungsakkumulation untersucht werden. Insbesondere wurde überprüft, inwiefern beigegebene Fasern den deutlich beschleunigten instabilen Rissfortschritt wirksam verzögern können. Mit der Geschwindigkeit des instabilen Rissfortschrittes eng verknüpft ist die Frage der Versagensankündigung im Hinblick auf ein Ermüdungsversagen des Betons.

Die vorliegenden, auf experimentellem und theoretischem Wege gewonnenen Erfahrungen sowohl zum Ermüdungsverhalten von Baustoffen und Bauteilen als auch zur Ermittlung von Betonkennwerten in Verbindung mit der Umsetzung in ein Bemessungskonzept sind Bestandteil dieser Arbeit.

2 Stand der Kenntnisse

2.1 Allgemeines

Zyklische Beanspruchungen, welche deutlich unterhalb der statischen Festigkeiten liegen, können bei Stahlbetonbauteilen zu einer fortschreitenden Schädigung und bei hohen Lastwechselzahlen sogar zum Ermüdungsversagen führen. Das Ermüdungsversagen beim Beton beginnt mit einer fortschreitenden Bildung von Mikrorissen über die Vereinigung von Makrorissen bis hin zu Gefügebrauchungen und vollständigem Verlust der Tragfähigkeit und ist somit, im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen, ähnlich dem Versagensmechanismus unter statischer Belastung. In der Vergangenheit wurden deshalb in vielen Fällen Schäden an Bauteilen falsch zugeordnet ((CEB-FIP 1988), (Schläfli 1999), (Sonoda, Horikawa 1982)).

Abhängig vom Spektrum auftretender Spannungen muss bei Beton zwischen Druckschwell- bzw. Zugschwell- und Druck-Zug-Wechselbeanspruchungen unterschieden werden. Zwar stellt sich der Schädigungsmechanismus bei der Betrachtung auf Meso-Ebene (Wittmann 1983) ähnlich dar, allerdings sind je nach Beanspruchungsart wesentliche Unterschiede im Schädigungsfortschritt und damit in der Anzahl ertragbarer Lastzyklen zu beobachten. Gegenstand des Forschungsvorhabens war im Wesentlichen die experimentelle Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von ultrahochfestem Beton unter wiederholten Druck-Zug-Wechselbeanspruchungen. Dabei wurde nur der Bereich hochzyklischer Beanspruchungen („high cycle fatigue“) mit Lastwechselzahlen, wie sie sich unter baupraktisch üblichen Nutzungsdauern einstellen, betrachtet. Auswirkungen niederzyklischer Einwirkungen mit hoher Amplitude („low cycle fatigue“), wie sie z.B. infolge von seismischen Einwirkungen auftreten, stellen einen Sonderbereich dar, der nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens war.

2.2 Grundlagen und Problematik von Konstruktionen aus ultrahochfestem Beton (UHPC)

Ultrahochfeste Betone weisen neben günstigen mechanischen Eigenschaften mit annähernd stahl-äquivalenten Druckfestigkeiten einen hohen Widerstand gegenüber Umwelteinflüssen auf. Diese Eigenschaften werden durch eine gegenüber Normalbeton (NSC) und hochfestem Beton (HSC) veränderte Zusammensetzung mit einer optimierten Korngrößenverteilung bei deutlich kleinerem Größtkorn (u. a. de Larrard, Sedran 1994), hohem Zementanteil, stark reduziertem Wasser/Bindemittel-Wert und Zugabe von Silikastaub ggf. in Verbindung mit Druck-, Wärme- bzw. Dampfnachbehandlung erreicht.

Das deutlich homogenisierte Betongefüge aus der Folge der hohen Packungsdichte und des verbesserten Verbundes zwischen Matrix und Zuschlag weist gegenüber Normalbeton deutlich weniger innere Gefügestörungen auf. Als Folge sind Druckfestigkeiten bis 250 MPa und darüber möglich. Der große Nachteil allerdings ist das ausgeprägt spröde Last-Verformungsverhalten, wenn keine Fasern zugegeben werden ((Bornemann et al. 2001), (Dugat et al. 1996), (König et al. 2001), (König et al. 2003a), (Richard 1996), (Richard, Cheyrezy 1995), (Schmidt et al. 2004), (Schneider et al. 2001)).

UHPC verhält sich unter Zugbeanspruchung bis zum Erreichen der Zugfestigkeit annähernd linear elastisch. Gegenüber Normalbeton zeigt sich insbesondere im Nachbruchbereich anhand bruchmechanischer Kenngrößen (z.B. durch eine mit zunehmender Festigkeit reduzierte charakteristische Länge) ein deutlich spröderes Materialverhalten.

Durch die Zugabe von Fasern (Stahl-, Polymer- oder Glasfasern) können die Eigenschaften von UHPC beeinflusst werden. Insbesondere durch Stahlfasern kann der Rissfortschritt im Mikrorissbereich verzögert („Rissbremse“) bzw. die Übertragung von Zugspannungen bei beginnender Makrorissbildung ermöglicht werden. Bei zugbeanspruchtem UHPC mit Fasern

können in Anlehnung an Stahlfaserbeton im Allgemeinen verschiedene Phasen beobachtet werden: die verteilte Rissbildung („multi-cracking“) mit verfestigender Charakteristik und das anschließende Ausziehen der Fasern (u. a. (Jungwirth, Muttoni 2004), (Orgass, Klug 2004)). Durch die Zugabe von Fasern wird die Duktilität wesentlich verbessert. Die Zug- und Druckfestigkeiten werden durch die verzögerte Mikrorissbildung in geringem Umfang günstig beeinflusst. Die Wirksamkeit von Fasern ist dabei von Fasertyp, -gehalt, -abmessungen und Faserorientierung abhängig. Die Zugfestigkeit ultrahochfester Betone ohne Fasern erreicht etwa 5% der Druckfestigkeit (6% bei Zugabe von Fasern). Im ungerissenen Zustand ist der Einfluss von Fasern auf das Last-Verformungs-Verhalten vernachlässigbar (Fehling, Leutbecher 2005). Unter Druckbeanspruchungen verhält sich UHPC mit und ohne Fasern bis 70-80% der Druckfestigkeit näherungsweise linear elastisch. Druckbeanspruchter Beton ohne Fasern versagt ausgeprägt spröde. Bei Zugabe von Fasern zeigt UHPC dagegen aufgrund der vorher aufgeführten Parameter ein duktileres Verhalten.

Bauteile aus UHPC werden vorerst in stationären Fertigungseinrichtungen hergestellt und erfordern veränderte Konstruktionsprinzipien. Durch aufgelöste Konstruktionen oder dünnwandige Bauteile werden das Eigengewicht und damit die ständig wirksame Belastung einer Konstruktion deutlich verringert ((König et al. 2003b), (Walraven 2004)). Die eingeschränkte Zugfestigkeit des UHPC erfordert meist eine Vorspannung der Bauteile mit oder ohne Verbund. Konventionelle Bewehrung wird insbesondere bei dünnwandigen Bauteilen, angesichts der Verformungen aus autogenem Schwinden bzw. des hohen Anteils an Silikastaub mit ggf. nachteiligen Auswirkungen auf die Alkalität des Baustoffes, von untergeordneter Bedeutung sein.

Speziell bei infrastrukturellen Ingenieurbauten, z.B. Brückenüberbauten können die günstigen mechanischen Eigenschaften von UHPC in Verbindung mit der hohen Dauerhaftigkeit sinnvoll eingesetzt werden. Für Brückenüberbauten können aufgelöste Konstruktionen z.B. in Form klassischer Fachwerksysteme oder unterspannter Träger ausgeführt werden. Auf vorgespannten Zugstäben aufbauende Konzepte insbesondere für unterspannte Systeme, die ganz oder teilweise auf den Einsatz von hochfestem bzw. ultrahochfestem Beton abzielen, wurden u. a. von (Muttoni 2003), (Fürst 2001) und (Fürst, Marti 1999) vorgeschlagen. Neben der Anwendung von klassischen bewehrten bzw. vorgespannten Elementen werden auch hybride Elemente, z.B. Stäbe aus stahlummanteltem UHPC verwendet (Tue, Schneider 2003). Tragwerke nach den beschriebenen Konzepten, die zum Teil hybride Elemente aus UHPC nutzen (Aitcin et al. 1998) oder vollständig aus UHPC bestehen (Reichel 2004), wurden bereits fertig gestellt (Bild 2.1).



Bild 2.1: Brückenelement aus ultrahochfestem Beton mit vorgespannten Zugstäben (aus Reichel 2004)

Einen gesonderten Anwendungsbereich stellen die Composit-Bauteile dar. UHPC wird hier vorwiegend zur Ertüchtigung bzw. Ergänzung von Stahlbetonbauteilen verwendet (Habel et al. 2005).

Die Verwendung von UHPC in vorgefertigten Fahrbahnplattenelementen bietet erhebliche Vorteile. Neben der Reduktion des Eigengewichts kann aufgrund der hohen Gefügedichtigkeit und den damit verbundenen guten Dauerhaftigkeitseigenschaften z.B. auf Abdichtung und Belag der Fahrbahnplatte verzichtet werden. Die Ausführung der bereits für hochfeste Betone konzipierten direkt befahrenen Platte wird in (Lindlbauer 2000) beschrieben und scheint für UHPC ebenso möglich.

Erste Anwendungen von UHPC für Brückendecks existieren bereits ((Hajar et al. 2004), (Kaptijn, Blom 2004)) und auch vorgespannte Fertigteilplatten für eine Fußgängerbrücke in Kassel wurden bereits ausgeführt (Fehling et al. 2004b). Im Ausland wurden bereits für diverse Projekte UHPC eingesetzt, u. a. Fuß und Radwegbrücken ((Acker, Behloul 2004), (Jovanovic et al. 2002)). Weitere Anwendungen, welche u. a. die hohe Gefügedichtigkeit nutzen sind in (Reineck et al. 2003) und (Reinhardt, Jooß 2003) beschrieben.

Bei Infrastrukturbauten nehmen die Verkehrslasten, durch die Reduktion des Eigengewichts, einen wesentlich größeren Anteil am Beanspruchungsspektrum ein. Demzufolge kommt der Sicherheit gegen Ermüdung bei Bauteilen aus UHPC eine wesentliche Bedeutung zu. Da insbesondere bei Elementen wie z.B. vorgespannten Zugstäben aufgelöster Systeme oder bei filigranen Fahrbahnplatten die Steifigkeit wesentliche Bedeutung für die Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit besitzt, muss zudem der mit einer fortschreitenden Ermüdungsschädigung des Betonquerschnitts einhergehende Steifigkeitsverlust zuverlässig vermieden werden.

Im Bild 2.2 ist exemplarisch das Last-Verformungs-Verhalten eines vorgespannten Zugstabes aus UHPC mit Fasern dargestellt. In Anlehnung an die DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton (DAfStb 2009) bzw. nach Vorschlägen für Bemessungskonzepte für Bauteile aus UHPC mit Fasern ((AFGC 2002), (DAfStb 2007), (Teutsch, Grunert 2004)), können im Betrieb (Grenz-zustand der Gebrauchstauglichkeit) planmäßig Zugspannungen zugelassen werden. Des Weiteren wird durch eine beschränkte Vorspannung eine wirtschaftliche Auslegung der Spannbewehrung erfüllt. Aufgrund der Erfahrungen bzw. dem aktuellen Kenntnisstand und dem sprödem Ermüdungszugversagen ist eine Überschreitung der Zugfestigkeit, durch die infolge der Betriebslasten entstehenden Zugspannungen, zu vermeiden.

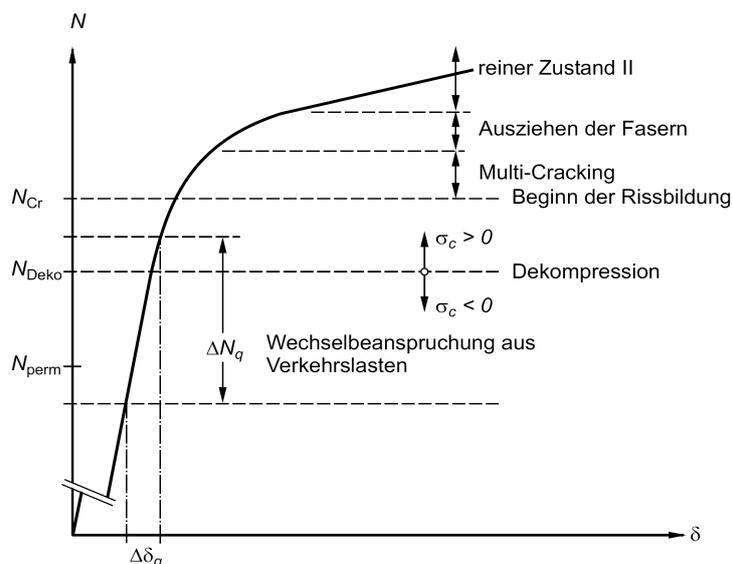


Bild 2.2: Tragverhalten eines vorgespannten Zuggliedes aus UHPC mit Fasern

Aus Bild 2.2 wird ersichtlich, dass der Beton unter Betriebsbedingungen wechselnden Beanspruchungen in Druck-Zug-Bereich ausgesetzt wird. Beanspruchungen im Wechselbereich führen bei Normalbeton, im Gegensatz zu Druckschwell- bzw. Zugschwellbeanspruchungen, zu einer reduzierten Ermüdungsfestigkeit. Wie bei dem im Bild 2.2 dargestellten vorgespannten Zugglied sind auch bei vorgespannten, zyklisch beanspruchten Bauteilen aus UHPC in der vorgedrückten Zugzone, z.B. vorgespannte Fahrbahnplatten oder Masten, generell ähnliche Verhältnisse anzutreffen.

2.3 Auswirkungen zyklischer Beanspruchungen auf Normalbeton

2.3.1 Allgemeines

Zur Charakterisierung der Auswirkungen zyklischer Lasten muss zwischen den verschiedenen Beanspruchungsbereichen (Zugschwell- bzw. Zugursprungs-, Druckschwell- bzw. Druckursprungs- und Wechselbeanspruchungen) unterschieden werden (s. Bild 2.3). Beton weist deutliche Unterschiede im Ermüdungsverhalten in Abhängigkeit des Bereichs der zyklischen Beanspruchung auf, insbesondere im Fortschritt der Schädigung, sowie im unmittelbaren Versagensbild. Trotz der offensichtlichen Unterschiede auf makroskopischer Ebene scheinen die grundlegenden Mechanismen des Schädigungsfortschritts auf Meso-Ebene bei den verschiedenen Beanspruchungsfällen ähnlich zu sein.

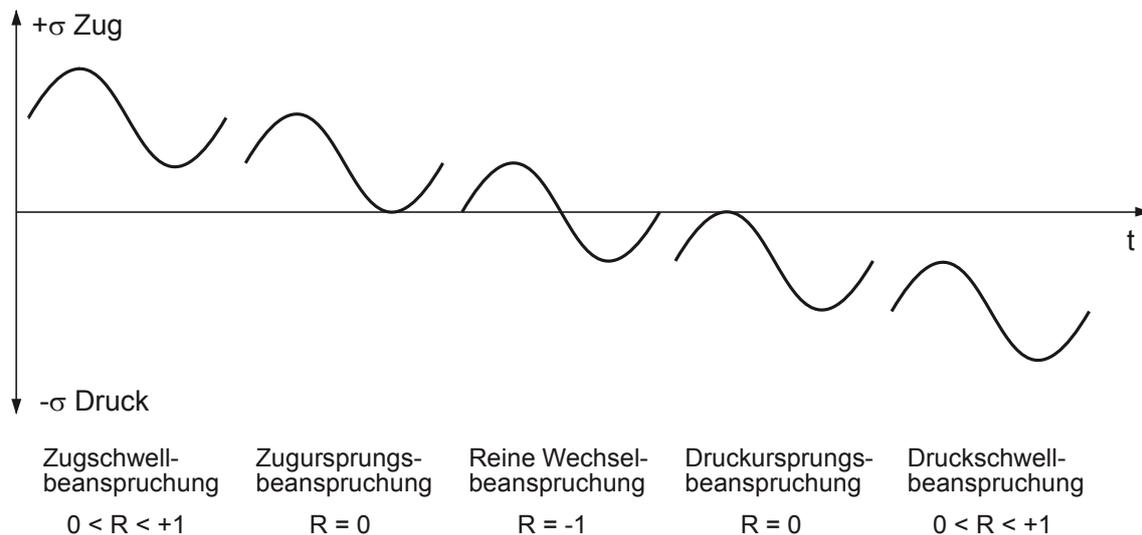


Bild 2.3: Beanspruchungsfälle beim Dauerschwingversuch (aus Kessler-Kramer 2002)

Zu den Auswirkungen zyklischer Beanspruchungen auf Normalbeton existiert eine Vielzahl von Arbeiten, wobei die Bedingungen, die zu einem Ermüdungsversagen von Beton führen, noch nicht geschlossen erklärt werden können. Einen allgemeinen Überblick über das Ermüdungsverhalten von Normalbeton geben u. a. (CEB-FIP 1988) und (RILEM 1984). Das Ermüdungsverhalten von Normalbeton unter Druckschwellbeanspruchung wurde u. a. in (Holmen 1984), (Klausen, Weigler 1979) und (Tepfers, Kutti 1979) untersucht. Erkenntnisse zum Ermüdungsverhalten bei Zugschwellbeanspruchungen bzw. in Biegezugversuchen bei zyklischer Beanspruchung enthalten u. a. (Cornelissen, Reinhardt 1984) und (Hilsdorf, Kesler 1966). Untersuchungen zur Ermüdung unter Wechselbeanspruchung liegen dem gegenüber in weit geringerem Umfang vor (u. a. (Cornelissen, Reinhardt 1984), (McCall 1958), (Murdock, Kesler 1960), (Tepfers 1982), (DAfStb 1987) und (Zhang et al. 1996)).

2.3.2 Versagensmechanismen und Beschreibung der Ermüdungsfestigkeit

Als wesentliche Mechanismen, die zu einem Ermüdungsversagen von Normalbeton führen, werden die fortschreitende Zerstörung des Verbundes zwischen den Zuschlagkörnern und der Matrix, das fortschreitende Wachstum der bereits im unbelasteten Beton vorhandenen Defekte und Mikrorisse und letztlich die Vereinigung der Mikrorisse zu makroskopisch sichtbaren Rissen genannt (u. a. (Murdock, Kesler 1960), (RILEM 1984)). Die Schädigungsmechanismen laufen dabei unabhängig vom Belastungstyp ab und treten also in ähnlicher Form sowohl bei Zugschwell-, Druckschwell- oder Wechselbeanspruchung auf. Die Geschwindigkeit des Schädigungsfortschritts, d.h. die Risswachstumsrate ist jedoch an die Art der Beanspruchung geknüpft. In (Schläfli 1999) wird das Wachstum der ermüdungsbedingten Mikro- bzw. Makrorisse neben irreversiblen viskosen Verformungen zudem mit dem Versatz des sich zyklisch öffnenden und schließenden Risses durch gelockerte Zementsteinpartikel bzw. Zuschlagkörner in Verbindung gebracht („Ermüdungsmotoren“).

Bei Betrachtung auf Makro-Ebene tritt ein Ermüdungsversagen bei Druckschwellbeanspruchungen und Wechselbeanspruchungen mit betragsmäßig geringen Unterlasten nach fortschreitender Gefügeflockung als vollständige Zerstörung des Betongefüges auf (Druckversagen) - das Gefüge „zerfällt“. Im Unterschied hierzu führt das Mikrorisswachstum bei Zugschwell- oder Wechselbeanspruchung mit überwiegenden Zugspannungen zu einer Trennrissbildung weit unterhalb der statischen Zugfestigkeit (Zugversagen).

Das fortschreitende Mikrorisswachstum bzw. die Gefügeflockung kann auf Makro-Ebene unabhängig vom Beanspruchungsbereich in Analogie zu den klassischen Modellen der Bruchmechanik (u. a. Paris, Erdogan 1963) in drei charakteristische Phasen eingeteilt werden - Rissentstehung (Phase I), stabiler Rissfortschritt (Phase II) und instabiles bzw. progressives Risswachstum (Phase III). Bei Beton können diese Phasen angesichts des offenkundig engen Zusammenhangs des Schädigungsmechanismus mit der Dehnsteifigkeit durch Längsdehnungsmessungen (u. a. (Holmen 1979), (Hordijk 1991), (Kessler-Kramer 2002), (Weigler, Klausen 1979)), aber auch durch Ultraschall-Laufzeitmessungen (u. a. Hohberg 2004) oder Schallemissionsanalyse ((Kessler-Kramer 2002), (Weigler, Klausen 1979)) erfasst werden (Bild 2.4). Bei Normalbeton umfassen die ersten beiden Phasen etwa 80% der Lebensdauer; eine wesentliche Beeinträchtigung der Restbruchlast ist hier noch nicht gegeben.

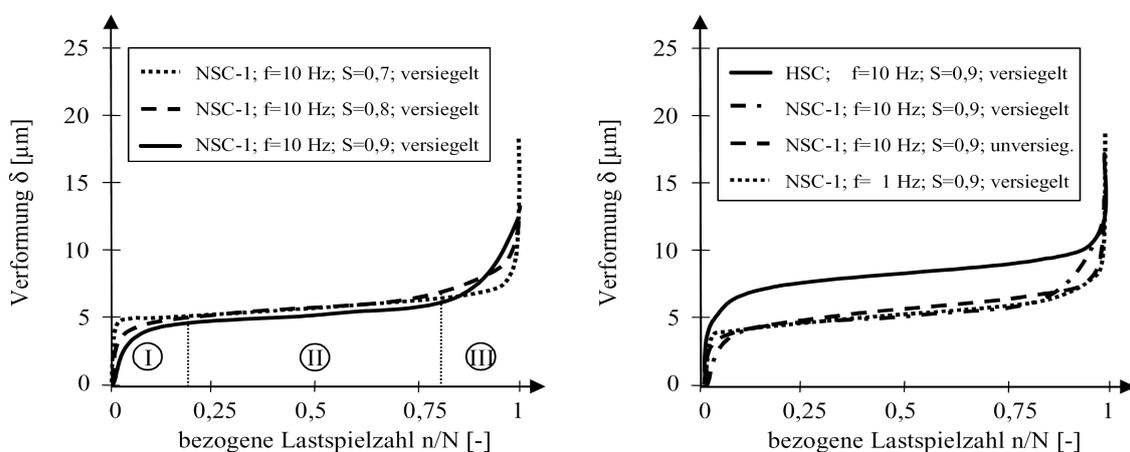


Bild 2.4: Mittlere Verformungen von gekerbten Zugprismen in Wöhlerversuchen mit zunehmender Lastspielzahl für verschiedene Belastungsgrade (links) und verschiedene Betongüten, Prüffrequenzen bzw. Nachbehandlungsarten (rechts) (aus Kessler-Kramer 2002)

Zur Beschreibung des Ermüdungswiderstandes dienen in der Regel Wöhlerdiagramme (S-N-Diagramme). In den Wöhlerdiagrammen wird die ertragbare Lastwechselzahl (N) gegen die zugehörige bezogene Spannungsschwingbreite (S) (meist halblogarithmisch) dargestellt. Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen zeigt Beton in allen Beanspruchungsbereichen, zusätzlich zum Einfluss der Spannungsschwingbreite, eine ausgeprägte Abhängigkeit des Ermüdungswiderstandes vom Mittelspannungsniveau. Zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens wird dadurch ein dritter von der Mittelspannung abhängiger Parameter ($R = \sigma_u / \sigma_o$) erforderlich. Eine Wöhlerlinie beschreibt hierbei die dem Einstufenkollektiv zugeordnete Ermüdungsfestigkeit und besitzt dem entsprechend bei realen Lastkollektiven nur in Verbindung mit Schadensakkumulationshypothesen Aussagekraft. Wöhlerlinien für Normalbeton lassen sich unabhängig vom Beanspruchungsbereich in halblogarithmischer Darstellung als Geradenschar abbilden. Charakteristisch für Normalbeton ist, dass eine Dauerfestigkeit (sog. „endurance limit“), d.h. eine theoretisch unendlich oft ertragbare Spannungsschwingbreite bisher nicht zweifelsfrei festgestellt werden konnte.

Zur statistischen Erfassung der Ermüdungsfestigkeit wird im Allgemeinen eine log-Normalverteilung der Bruchschwingspielzahlen angenommen; für die Ergebnisse zyklischer Biegezugversuche wurde in (Shi et al. 1993) eine Weibull-Verteilung vorausgesetzt. Die in Regelwerken auf die statische Festigkeit bezogenen Wöhlerlinien repräsentieren allerdings in der Regel Mittelwerte der Ermüdungsfestigkeit (50%-Quantilen), da die Streuungen der Ermüdungsfestigkeit u. a. nach (Holmen 1979) über die Streuungen der statischen Festigkeitskennwerte erfasst werden kann.

2.3.3 Experimentelle Ansätze für Zugschwell- und Wechselbeanspruchung

Hinsichtlich der experimentellen Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Normalbeton im Zugschwell- und Wechselbereich sind zwei grundlegende Ansätze zu unterscheiden:

- Zum einen können in klassischen, kraftgesteuerten Wöhler- oder Betriebsfestigkeitsversuchen analog zum Vorgehen im Druckschwellbereich Zusammenhänge zwischen Ermüdungsfestigkeit und Lastwechselzahl bei Vorgabe von Schwingbreite und Mittelspannungsniveau bestimmt werden. Eine statistische Auswertung der Versuche ermöglicht die Ableitung von Wöhlerlinien bzw. von für Beton, angesichts der Verknüpfung zum Mittelspannungsniveau, anschaulicheren Goodman-Diagrammen (u. a. (Cornelissen, Reinhardt 1984), (DAfStb 1987)).
- Dem gegenüber ist es mit verformungsgesteuerten Zugschwell- bzw. Wechselversuchen möglich, Materialmodelle auf bruchmechanischer Basis für zyklisch beanspruchten Beton, die im Wesentlichen auf Spannungs-Rissöffnungs-Beziehungen aufbauen, zu formulieren. (u. a. (Yankelevsky, Reinhardt 1989), (Hordijk 1991), (DAfStb 1991), (Kessler-Kramer 2002)). Die Materialmodelle machen den Riss- bzw. Schädigungsfortschritt einer analytischen Beschreibung zugänglich und ermöglichen in Verbindung mit z.B. dem „fictitious crack model“ (vgl. Hillerborg et al. 1976) die Implementierung in Finite-Element-Formulierungen. Eine unmittelbare Abschätzung der ertragbaren Lastzyklen ähnlich dem Vorgehen auf Grundlage von Wöhlerlinien ist allerdings nicht möglich.

Für UHPC erscheint es zunächst sinnvoll, die Grundlagen der Ermüdung bei Wechselbeanspruchungen anhand des erstgenannten Ansatzes zu bestimmen. Damit ist eine Ableitung pragmatischer Hilfsmittel für einen vereinfachten Nachweis von wechselbeanspruchten Bauteilen aus UHPC gegen Ermüdung möglich.

2.3.4 Bisherige Ermüdungsversuche und Ergebnisse unter Zugschwell- und Wechselbeanspruchungen

Experimentelle Untersuchungen über das Ermüdungsverhalten von Beton unter Zugschwellbeanspruchungen erfolgten bisher anhand zentrisch beanspruchter Versuchskörper. Es existieren außerdem auch Versuche an zyklisch beanspruchten Biegezugversuchskörpern (z.B. Hilsdorf, Kesler 1966) und Spaltzugkörpern (z.B. Tepfers 1982). Versuche im Wechselbereich waren aufgrund der aufzubringenden Druckbeanspruchungen primär auf zentrisch beanspruchte Prismen beschränkt. Eine Zusammenstellung einiger bisher verwendeten zentrisch beanspruchten Versuchskörper zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens bei Wechselbeanspruchung (NSC und HSC) sowie Versuchskörper für statische Zugversuche (UHPC) (z.B. Fehling et al. 2004a) sind in Bild 2.5 dargestellt. Lediglich in (Tepfers 1982) wurden Spaltkörper mit vorgedrückter Spaltebene für die Versuche verwendet. In der Regel werden zur Ermittlung bruchmechanischer Kenngrößen anhand gemessener Verformungen bei verformungsgesteuerten Versuchen zentrisch beanspruchte Prismen oder Biegezugkörper mit jeweils eingepprägter Kerbe verwendet.

Aus den Ergebnissen der bisher in der Literatur beschriebenen Versuche kann eine Vielzahl von Einflussfaktoren, die sich mehr oder weniger auf die Ermüdungsfestigkeit auswirken, geschlossen werden. Die wichtigsten Auswirkungen auf die Ermüdungsfestigkeit sind die Spannungsschwingbreite und die Mittelspannung. Des Weiteren haben weitere Lastparameter Einfluss auf das Ermüdungsverhalten. So steigt mit höherer Frequenz bzw. Dehnungsrate aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften der Zementmatrix die Ermüdungsfestigkeit ebenso an (Kessler-Kramer 2002), wie bei Wartezeiten zwischen den Lastblöcken (Hilsdorf, Kesler 1966). Grundlegende Überlegungen und zugehörige Literatur zur Anwendbarkeit der Palmgren-Miner-Hypothese und damit zum Einfluss der Abfolge von Lastamplituden sind in (Zilch et al. 2004) zusammengefasst. Neben den Lastparametern kommt vor allem der Ausbildung des Prüfkörpers (zentrische Beanspruchung bzw. Biegung), Abmessungen in Zusammenhang mit dem Maßstabseinfluss („size effect“), der Betonzusammensetzung (Zuschlagform und Größe, Luftporenvolumen, Zementgehalt) und den vorherrschenden Randbedingungen, insbesondere dem Feuchteangebot (Feuchtegehalt des Betons, Feuchtegradient) und der Betonnachbehandlung, Bedeutung im Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit zu. Der Einfluss des Feuchteangebots im Vergleich wassergelagerter oder versiegelter Proben mit trockenen Proben ist hierbei unter anderem auf den höheren Hydratationsgrad zurückzuführen. Gleichzeitig ist der Gehalt an freiem Wasser in den Mikroporen der Matrix für die verzögerte Mikrorissbildung bei höheren Dehnraten entscheidend (Stéfan-Effekt, vgl. Schmidt-Hurtienne 2000). Bei einer Druckbeanspruchung wirkt sich der Feuchtegehalt mit zunehmend dichterem Porensystem allerdings negativ auf die Ermüdungsfestigkeit aus. Das mit dem Feuchteangebot gekoppelte Schwinden der Matrix ist darüber hinaus zum einen für Risse an der Oberfläche und zum anderen im wesentlichen Maße für innere Defekte an der Grenzfläche von Zuschlagkorn zur Matrix verantwortlich, welche die Ermüdungsfestigkeit von Normalbeton nachhaltig vermindern.

Die nur in begrenztem Umfang durchgeführten Versuche an Normalbeton im Wechselbereich zeigen deutlich, dass die Ermüdungsfestigkeit drastisch absinkt, wenn ein Vorzeichenwechsel der Beanspruchung auftritt. (Cornelissen, Reinhardt 1984) stellen dies ebenso für den Beanspruchungsbereich mit betragsmäßig geringen Druckspannungen fest, wie auch (DAfStb 1987) für den Bereich überwiegender Druckspannungen und bei Zugspannungen geringer Größe. Die gravierenden Auswirkungen wechselnder Vorzeichen bei zyklischer Beanspruchung auf den Schädigungsfortschritt werden u. a. anhand verformungsgesteuerter Versuche in (Kessler-Kramer 2002) bestätigt.

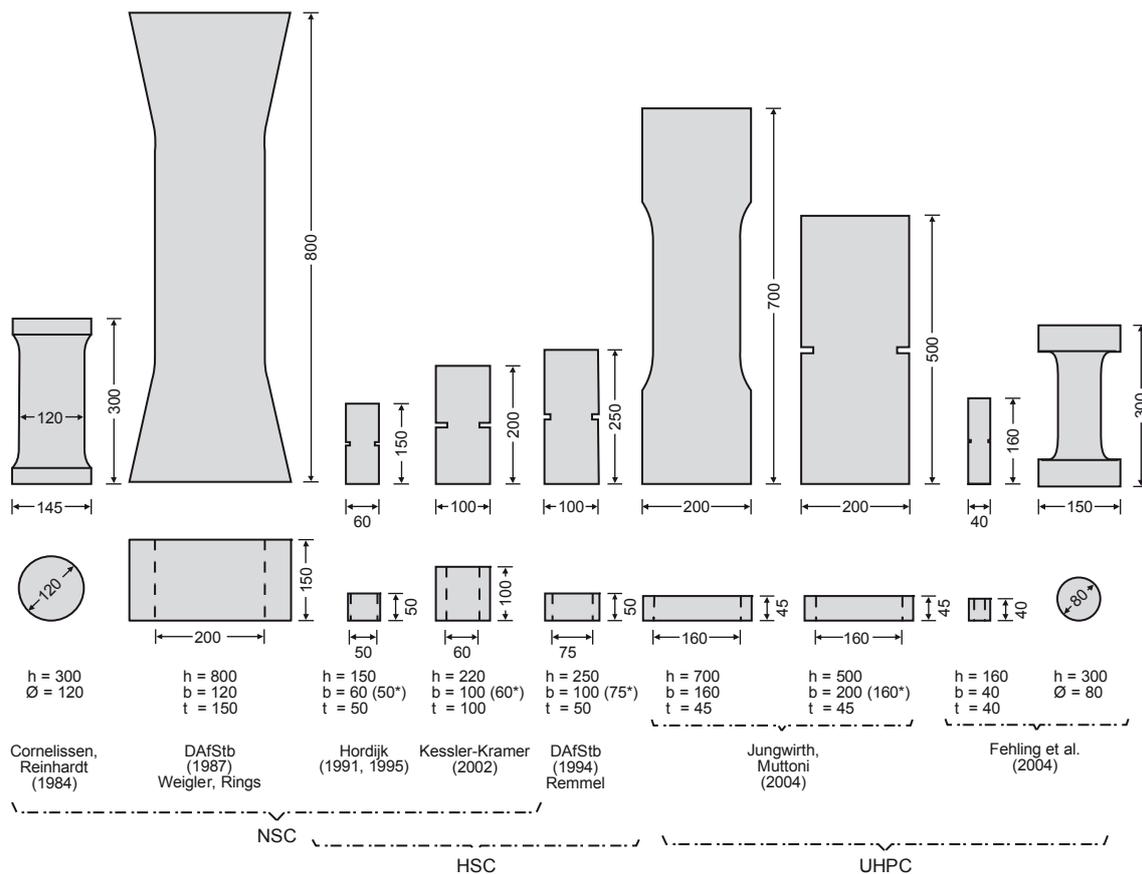


Bild 2.5: Zentrisch beanspruchte Versuchskörper zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens bei Wechselbeanspruchung (NSC und HSC) sowie Versuchskörper für statische Zugversuche (UHPC)

Der deutlich beschleunigte Schädigungsfortschritt wird zum einen durch die aus Zug- und Druckspannungen entstehenden, jeweils unterschiedlich orientierten Mikrorisse erklärt (Cornelissen, Reinhardt 1984), die nach (DAfStb 1987) im Gegensatz zu Schwellbeanspruchungen das gesamte Zuschlagkorn umlaufen. Zum anderen werden Kerbspannungen an der Risswurzel, die bei Druckspannungen infolge der Behinderung des vollständigen Schließens durch Matrix- bzw. Zuschlagpartikel entstehen, angeführt ((Cornelissen, Reinhardt 1984), (Kessler-Kramer 2002)).

Bei Darstellung der zugeordneten Festigkeitslinien in einem Goodman-Diagramm weisen die Kurven der jeweiligen Lastspielzahlen im Wechselbereich eine gegenüber den Schwellbereichen signifikante Spreizung auf. In Bild 2.6 sind neben den aus Wöhlerlinien entwickelten Grenzlinien für den Druckschwellbereich nach (DIN EN 1992-1-1:2005-10-00) bzw. (DIN 1045-1:2008-08-00) auch die Grenzen des Zugschwellbereichs von (Cornelissen, Reinhardt 1984) eingetragen. Die Grenzlinien des Wechselbereichs folgen für geringe Druckbeanspruchungen einem in (Cornelissen, Reinhardt 1984) angegebenen Vorschlag, für hohe Druckbeanspruchungen den Ergebnissen nach (DAfStb 1987). Nach (Rings 1986) tritt bereits bei geringen Zugspannungen ein Wechsel der Brucharten vom Druck- zum Zugversagen auf, während gleichzeitig die ertragbaren Lastwechselzahlen signifikant abnehmen.

Es ist anzumerken, dass für zyklisch wechselnd beanspruchten Normalbeton keine schlüssigen Wöhlerlinien existieren, die den gesamten relevanten Bereich erfassen.

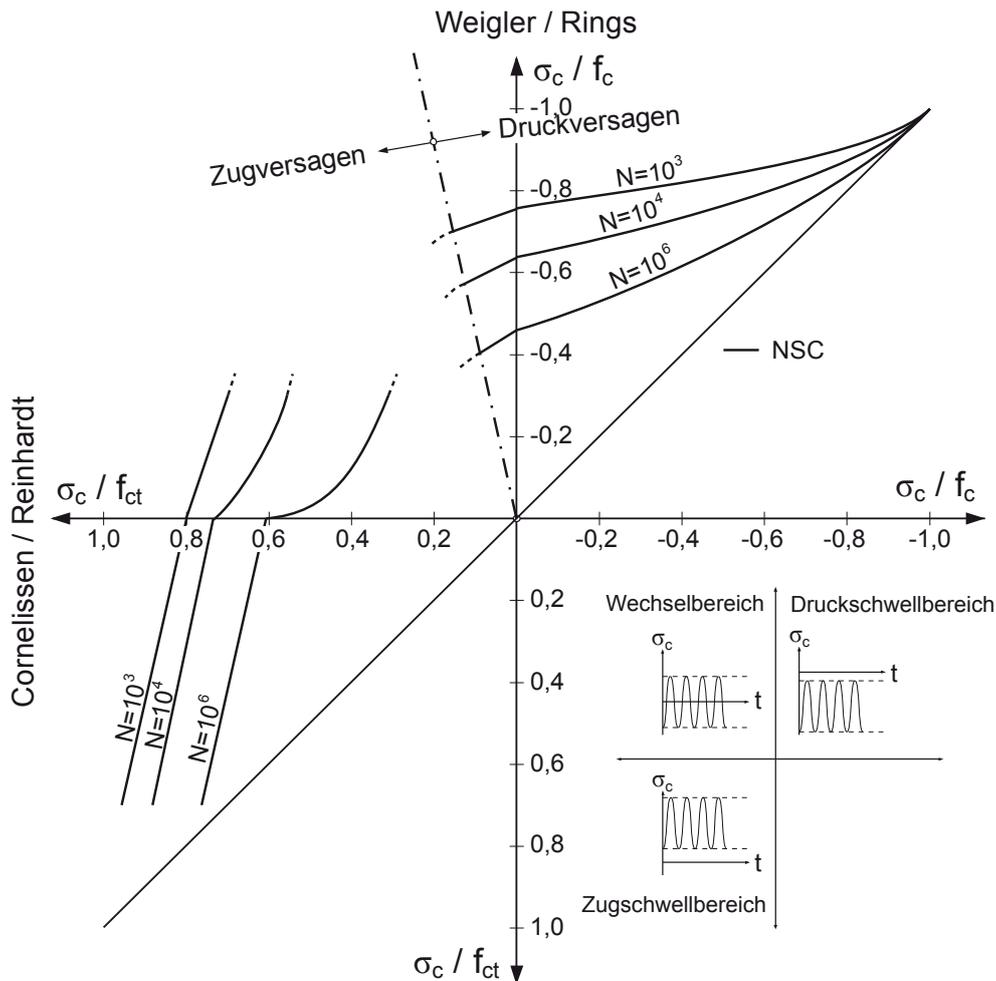


Bild 2.6: Goodman-Diagramm für zyklisch beanspruchten Normalbeton. Ergebnisse für den Normalbeton nach (Cornelissen, Reinhardt 1984) bzw. (DAfStb 1987)

2.4 Zyklische Beanspruchung von hochfestem Beton und Stahlfaserbeton

2.4.1 Hochfester Beton (HSC)

Das Ermüdungsverhalten von hochfesten Betonen ist nicht uneingeschränkt mit dem von Normalbeton vergleichbar. Hochfester Beton weist im Vergleich zu Normalbeton wesentliche Unterschiede auf, wie z.B. eine höhere Gefügedichtigkeit, eine geringere Anzahl von Gefügestörungen bei verbessertem Verbund zwischen Matrix und Zuschlag, sowie ein spröderes Last-Verformungs- bzw. Bruchverhalten. Versuche zum Ermüdungsverhalten liegen allerdings nur in geringem Umfang als Druckschwell- und Zugschwellversuche vor (z.B. König et al. 2006). Wöhlerversuche im Wechselbereich sind zurzeit nicht bekannt. Die Anmerkung nach (CEB-FIP 1995) zu den sehr weit auf der sicheren Seite liegenden Regeln des (CEB-FIP 1993) zur Ermüdung im Wechselbereich ist daher nur bedingt nachvollziehbar.

Die Mechanismen der Schädigungsakkumulation bzw. des Ermüdungsversagens sind beim hochfesten Beton ähnlich dem Normalbeton (u. a. (Hordijk et al. 1995), (Lambotte, Taerwe 1987), (DAfStb 1994b)). Jedoch ist die Abhängigkeit von Dehnrates bzw. Belastungsfrequenz gegenüber dem Normalbeton verringert (Kessler-Kramer 2002). Dagegen konnte eine ausgeprägte Abhängigkeit von den Feuchtebedingungen festgestellt werden. Aufgrund des dichten Gefüges bzw. der geringen Kapillarporosität wirkt sich durch Druck beanspruchter her-

vorgerufener Porenüberdruck nachteilig auf die Ermüdungseigenschaften aus (Brosge 2001).

Einige Arbeiten zeigen einen erheblich beschleunigten Rissfortschritt in Phase III (instabiles Risswachstum) im Gegensatz zum Normalbeton, der offensichtlich auf die höhere Materialsprödigkeit zurückzuführen ist ((Kessler-Kramer 2002), (Hohberg 2004), (Kim, Kim 1999)). Jedoch wurde in aktuellen Untersuchungen von (König et al. 2006) in kraftgeregelten Druckschwellversuchen ein dem normalfestem Beton entsprechendes Verformungsverhalten mit einer ausgeprägten Phase III beobachtet, die bereits nach etwa 85% der ertragbaren Lastspiele einsetzte. Auch auf der Grundlage dieser Untersuchungen konnten bislang keine spezifischen Wöhlerlinien für hochfesten Beton angegeben werden.

2.4.2 Faserbeton (FRC)

Fasern werden Beton in der Regel zur Verbesserung der Gebrauchseigenschaften und in zunehmendem Maß zur Erhöhung von Tragfähigkeit und insbesondere Duktilität beigegeben. Wesentliche Einflussgrößen auf die Wirksamkeit der Fasern sind Faserverteilung und Faserorientierung und diese wird wiederum durch die Bauteilabmessungen, Betonzusammensetzung und -konsistenz und insbesondere Betonierrichtung beeinflusst ((Bonzel, Schmidt 1984), (Erdem 2002), (Kützing 2000), (DAfStb 1999), (Lin 1996), (Rosenbusch 2004), (Schönlin 1988)).

Systematische Untersuchungen zu den Auswirkungen von Fasern auf das Ermüdungsverhalten bei normalfestem und hochfestem Beton liegen nur in geringem Umfang vor. Die bisher durchgeführten zyklischen Biegezugversuche lassen aber ein paar wesentliche Einflüsse erkennen. Nach (Tawfiq et al. 1999) wirken Polymerfasern (z.B. Polypropylen, Polyolefine) als sog. Rissstopper. Sie verhindern das Fortschreiten der Mikrorisse und verzögern damit die Rissöffnung. Des Weiteren wird der ermüdungsbedingte Steifigkeitsverlust in den Phasen I und II vermindert. Allerdings wird auch gezeigt, dass die bei gerissenen Bauteilen unmittelbar zugbeanspruchten Fasern (z.B. in Biegezugversuchen) bei zyklischen Belastungen nur über eine geringe Anzahl weiterer Lastwechsel wirksam sind.

2.5 Zyklische Beanspruchung bei ultrahochfestem Beton

Experimentelle Untersuchungen zum Verhalten von ultrahochfestem Beton unter zyklischer Beanspruchung sind bisher nur in geringem Umfang durchgeführt worden. Erste Ergebnisse zur Ermüdung unter Druckschwellbeanspruchung liegen von (Fehling et al. 2005) vor. Ermüdungsversuche unter Biegezugbeanspruchung werden in (Lappa et al. 2004) beschrieben. Darüber hinaus wird zurzeit an der Universität Hannover im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms SPP 1182 „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton“ das Ermüdungsverhalten von UHPC unter ein- und mehraxialer Beanspruchung untersucht. Die Ergebnisse der Druckschwellversuche an Zylindern ($d/h = 150/300$ mm) zeigen, dass bei UHPC analog zu Normalbeton eine ausgeprägte Mittelspannungsabhängigkeit besteht. In (Fehling, Bunje 2003) wird für den UHPC ein ähnliches Ermüdungsverhalten wie beim Normalbeton vermutet. Dabei wurden Versuche an UHPC mit und ohne Fasern durchgeführt, jedoch fehlt bislang eine systematische Auswertung.

Aus den ersten Ergebnissen der Biegezugversuche an Ceracem (vgl. Maeder et al. 2004) ist zu erkennen, dass für UHPC der bereits für HSC in zahlreichen Untersuchungen festgestellte Rissfortschritt in Phase II deutlich ausgeprägt ist. Es wird außerdem auf die wesentlichen Einflüsse der Faserorientierung hingewiesen. Zyklische Biegezugversuche zur Untersuchung des Fasereinflusses zeigen, dass bei vorliegenden Makrorissen, d.h. nach einsetzender „multi-cracking“-Phase, die zugbeanspruchten Fasern schrittweise aus der Matrix gezogen werden und demzufolge die Lebensdauer nach einer Rissbildung durch die Verbundermüdung der Fasern stark reduziert wird (Bornemann, Faber 2004). Die Restlebensdauer kann

jedoch durch die Beimischung von Polymerfasern (Polyvinylalkohol PVA oder PVOH) günstig beeinflusst werden. Dieses spezifische Verhalten resultiert aus dem Zusammenspiel vieler kurzer und dünner Polymerfasern, welche die vorhandenen Risse überbrücken und somit ein Versagen des Bauteils hinauszögern (Rissstopper).

2.6 Schadensakkumulationsmodelle

Bauteile unterliegen unregelmäßig wiederkehrenden Beanspruchungen, die in unterschiedlicher Kombination und Höhe auftreten. Diese Betriebsbeanspruchungen sind jedoch zumindest in Ihrer Abfolge und Häufigkeit, oft aber auch hinsichtlich ihrer Höhe nicht bekannt, so dass die Lebensdauer vorab nicht experimentell ermittelt werden könnte. Dennoch wird versucht im Rahmen von Betriebsfestigkeitsnachweisen die Lebensdauer von Bauteilen zu ermitteln. Dazu werden Näherungsverfahren benutzt, die ausgehend von idealisierten Beschreibungen der Einwirkungen eine Abschätzung der Lebensdauer auf der Basis von Wöhlerlinien ermöglichen. Die Wöhlerlinien werden auf der Grundlage einstufiger Versuche festgelegt, die eine bestimmte Beanspruchung von gleichbleibender Höhe und Frequenz abbilden. Die Krafterbringung erfolgt in den kraftgesteuerten Versuchen üblicherweise sinusförmig und kontinuierlich. Ziel der Näherungsverfahren zur Abschätzung der Lebensdauer ist der Vergleich der idealisierten Einwirkungen mit den Ergebnissen der einstufigen Versuche in Form von Wöhlerlinien. Im Falle der Einwirkung mehrstufiger Lastkollektive ist für diesen Vergleich eine Schadensakkumulationshypothese erforderlich, die den Schädigungsfortschritt beschreibt. Die bekannteste Schadensakkumulationshypothese geht auf (Palmgren 1945) und (Miner 1945) zurück. Sie geht von einem mit steigender Schwingspielzahl linear anwachsenden Schädigungsverlauf aus. Die durch einzelne Lastwechsel hervorgerufenen Schädigungen werden unabhängig von deren zeitlichem Auftreten aufsummiert, bis ein kritischer Schädigungswert erreicht wird. Die Schadensakkumulationshypothese von Palmgren und Miner wurde ursprünglich für Bauteile aus metallischen Werkstoffen entwickelt. Bereits für diesen Anwendungsbereich kann die errechnete Lebensdauer erheblich von der Wirklichkeit abweichen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die zeitliche Reihenfolge und damit ein Einfluss der Beanspruchung auf nachfolgende Lastzyklen nicht berücksichtigt werden. Im Maschinenbau führt diese Vereinfachung bei der Lebensdauerberechnung für Bauteile aus metallischen Werkstoffen zu Abweichungen zwischen Rechnung und Realität, wenn die Bauteile Eigenspannungen aufweisen, die wiederum die Ursache für den Reihenfolgeeinfluss darstellen. Bei einem nicht linear elastischem Werkstoff wie Beton, der sich durch ausgeprägte plastische Verformungsanteile, die sofort oder verzögert entfestigend wirken und zu einer Mittelspannungsempfindlichkeit beitragen, auszeichnet, ist infolge des noch deutlich ausgeprägteren Einflusses der Beanspruchungsreihenfolge mit besonders deutlichen Abweichungen zu rechnen. Aber auch andere Einflussgrößen, wie z.B. die Belastungsfrequenz oder Belastungspausen, die sich auf die Ermüdungsfestigkeit auswirken, bleiben bei Anwendung der Palmgren-Miner-Hypothese unberücksichtigt. In zahlreichen Arbeiten (z.B. (DAfStb 1987), (Shi et al. 1993)) wird deshalb darauf hingewiesen, dass die Palmgren-Miner-Hypothese für Beton unbefriedigend ist. Für die Anwendung im Betonbau wurde deshalb ein zusätzlicher Interaktionsfaktor eingeführt, der in Abhängigkeit von der Beanspruchungsart beispielsweise zu einer Verlängerung oder Verkürzung der mit der Palmgren-Miner-Hypothese ermittelten Lebensdauer führt (RILEM 1984). Trotz ihrer Unzulänglichkeiten stellt die Schadensakkumulationshypothese von Palmgren und Miner aber ein Standardverfahren dar, das u. a. für den Betriebsfestigkeitsnachweis für Stahlbeton- und Spannbetonbrücken nach (DIN FB 102:2009-03-00) Anwendung findet.

Im (DIN FB 102:2009-03-00) ist auch ein vereinfachter Betriebsfestigkeitsnachweis auf der Basis einer schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreite vorgesehen. Diese stellt eine

dem Beanspruchungskollektiv schädigungsgleiche Spannungsamplitude dar, die mit einer Häufigkeit entsprechend der Lastspielzahl am Knickpunkt der Wöhlerlinie auftritt.

Besondere Bedeutung kommt neben anderen Modifikationen der Palmgren-Miner-Hypothese der relativen Schadensakkumulationshypothese (z.B. (Haibach 2006), (Schütz 1976)) zu. Diese geht davon aus, dass die für ein bestimmtes mehrstufiges Kollektiv innerhalb der Lebensdauer experimentell ermittelte Schadenssumme, die von der Miner-Schadenssumme deutlich abweichen kann, auch erreicht wird, wenn das gleiche Bauteil einem anderen, ähnlichen Schädigungskollektiv unterworfen wird. Besonders gute Übereinstimmungen zwischen einzelnen Kollektiven werden dann beobachtet, wenn sich diese nur in der Häufigkeit des Auftretens mittlerer Beanspruchungen unterscheiden.

Andere Schadensakkumulationshypothesen, wie sie z.B. von (Schütz 1976) zusammengestellt wurden, gehen wie die Palmgren-Miner-Hypothese ebenfalls von einer linearen Schädigung aus. Sie wurden für den Maschinenbau, insbesondere den Flugzeug- und Fahrzeugbau formuliert und unterscheiden sich von der Palmgren-Miner-Hypothese durch die Addition mehr oder weniger großer Beträge zur Schadenssumme nach Miner entsprechend dem Vorgehen nach (RILEM 1984).

Betriebsfestigkeitsnachweise können auch auf der Grundlage bruchmechanischer Untersuchungen geführt werden, die das Ziel haben, den Ermüdungsrisssfortschritt zu beschreiben. Dieser wird in Abhängigkeit vom so genannten Spannungsintensitätsfaktor ausgedrückt, der aus der linear elastischen Bruchmechanik bekannt ist. Für Beton stellt (Gylltoft 1984) ein entsprechendes Modell vor. Obgleich die Berücksichtigung der Belastungsgeschichte und einer Vorschädigung möglich ist, ist eine befriedigende Beschreibung der bei Ermüdung auftretenden Rissentwicklung nicht möglich, da die in diesem Zusammenhang wesentlichen Fragestellungen nach der Rissentstehung und der mit einem Schwellenwert korrespondierenden Risslänge, unterhalb der kein Rissfortschritt stattfindet, durch zusätzliche Untersuchungen abzuklären sind. Dafür stehen zumindest für metallische Werkstoffe mit dem Kerbgrundkonzept (z.B. Haibach 2006) neuere Verfahren für die Lebensdauerberechnung in der Phase der Rissentstehung zur Verfügung. Für die Anwendung dieser Verfahren müssen Werkstoffkenndaten in dehnungsgesteuerten Wöhlerversuchen an gekerbten Proben ermittelt werden.

Neben den bruchmechanisch begründeten Verfahren zur Lebensdauerberechnung sind auch probabilistische Ansätze bekannt. Auch für diese Verfahren bildet die Palmgren-Miner-Hypothese die Basis für die Formulierung von Grenzzustandsfunktionen, mit welchen die Wahrscheinlichkeit eines Ermüdungsversagens mit numerischen Verfahren bestimmt werden kann ((Rackwitz, Zilch 2002), (Buba 2004)).

2.7 Vorarbeiten an der Technischen Universität München

Im Jahr 2005 wurde in Zusammenarbeit des Lehrstuhls für Massivbau mit dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung der Technischen Universität München durch Stiftungsmittel finanzierte Grundlagenuntersuchungen zu UHPC durchgeführt. Dabei wurde das Verhalten ultrahochfester Betone mit Fasern unter Zugbeanspruchung durch wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze in Verbindung mit Verbundmodellen für eingebettete Fasern simuliert (Spitra 2006). Außerdem wurde in Versuchen an konsolförmigen Ausziehkörpern das Verbundverhalten konventioneller Betonstähle in UHPC untersucht. Weitere Untersuchungen zum Verbundversagen durch Sprengrissbildung zeigten, dass bei Bauteilen aus UHPC die erforderliche Betondeckung der Bewehrung nicht mehr durch die Umgebungsbedingungen dominiert werden wird. Analog zu (Holschemacher et al. 2004) konnte ein sehr steifes Verbundverhalten bis zur Bildung von Sprengrissen beobachtet werden. Die anschließende Re-

duzierung der Verbundtragfähigkeit ist wesentlich an die Betondeckung und den Fasergehalt gekoppelt.

Weitere Untersuchungen am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München wurden zum Haftverbund unbewehrter Schubfugen bei Ergänzung von UHPC-Bauteilen durch Normalbeton bzw. hochfestem Beton durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen einen reduzierten Haftverbund im Vergleich zu Schubfugen bei Kombination von NSC mit HSC (Zilch, Müller 2004). Angesichts der im Wesentlichen stationären Fertigung von UHPC-Bauteilen und dem anschließenden nachträglichen Fügen, wurden auch Versuche zum Verkleben von UHPC mit Epoxidharzen durchgeführt (Zilch, Borchert 2005). Aufbauend auf diesen Vorarbeiten an der Technischen Universität München wurden im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms SPP 1182 „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton“ die beiden Vorhaben „Fügen von Bauteilen aus Ultrahochfestem Beton (UHPC) durch Verkleben“ und „Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich“ am Lehrstuhl für Massivbau durchgeführt.

3 Versuchsprogramm

3.1 Allgemeines

Die Förderung des Forschungsvorhabens durch die DFG erfolgte in zwei Förderperioden. Während der ersten Förderperiode wurde das Ermüdungsverhalten einer feinkörnigen Mischung (hier: M2Q) untersucht. Die Arbeiten in der zweiten Förderperiode umfassten das Ermüdungsverhalten einer modifizierten Feinkornmischung M3Q (M2Q mit anderem Mikrosilika) und eines grobkörnigen UHPC (hier: B5Q).

Dementsprechend gliedert sich das Versuchsprogramm in zwei Teile:

- Ermüdungsversuche am feinkörnigen UHPC (M2Q bzw. M3Q)
- Ermüdungsversuche am grobkörnigen UHPC (B5Q)

Zusätzlich wurden begleitend einige Untersuchungen mit den Mischungszusammensetzungen und zu den Festigkeiten bzw. Festigkeitsentwicklungen durchgeführt. Die Ergebnisse der begleitenden Untersuchungen werden in den weiteren Abschnitten beschrieben und näher erläutert.

Für das Versuchsprogramm in der ersten Förderperiode waren vier Versuchsreihen vorgesehen. Für die Hauptversuche wurde an UHPC-Körpern, die aus einer aus baustoffkundlicher Sicht optimierten Rezeptur eines bei 90° wärmebehandelten UHPC mit Fasern hergestellt wurden, ein breites Spektrum der möglichen Kombinationen (σ_u , σ_o) untersucht. Drei ergänzende Versuchsreihen dienten zur Identifizierung der Auswirkungen von Einflussgrößen wie Faserzugabe, -orientierung und Wärmebehandlung bei eingeschränkter Bandbreite der Parameter (σ_u , σ_o).

Für die Formulierung entsprechender Bemessungsansätze für wechselbeanspruchte Bauteile mussten die in der ersten Förderperiode gewonnenen Erfahrungen über das Ermüdungsverhalten von UHPC im Druck-Zug-Wechselbereich zunächst erweitert werden. Dazu wurden in der zweiten Förderperiode, wie in der ersten Förderperiode, kraftgesteuerte, einstufige Wöhlerversuche an zentrisch belasteten UHPC-Körpern mit vorgegebenen Unter- und Oberspannungen durchgeführt mit dem Ziel, eine Grenzlinie für den Bruchartwechsel im Goodman-Diagramm anzugeben. Die dabei betrachteten Beanspruchungskombinationen ergänzen die Untersuchung der ersten Förderungsphase.

Ferner sollte in der zweiten Förderperiode der Verlauf der Wöhlerlinien im baupraktisch relevanten Bereich hoher Lastspielzahlen ($> 10^7$) angegeben werden. (DIN FB 101:2009-03-00) gibt die Anzahl der pro Jahr für einen LKW-Fahrstreifen zu erwartenden Lastwagen für eine Autobahnbrücke je Fahrtrichtung mit $2 \cdot 10^6$ an. Aus einer Nutzungsdauer für Brücken von 50 bis 100 Jahren resultieren aus dieser Beanspruchung Lastwechselzahlen im Bereich von 10^8 bis $2 \cdot 10^8$. Hinsichtlich der Beschreibung der Wöhlerlinien in diesem Bereich wurden für ausgewählte Kombinationen (σ_u , σ_o) weitere einstufige kraftgeregelte Wöhlerversuche durchgeführt. Besondere Bedeutung kommt hierbei den durchgeführten Messungen von Prüfkörperverformungen während der Wechselbeanspruchung zu. Auf der Basis der lastwechselabhängigen Erfassung von Längsdehnungen in der ausgeprägten Phase stabilen Risswachstums (Phase II) wurde der aus der Literatur für normalfesten und hochfesten Beton bekannte Zusammenhang zwischen dem mittleren Last-Steifigkeitsverlust pro Lastwechsel und der Bruchlastspielzahl überprüft bzw. quantifiziert. Der Zusammenhang soll für Aussagen für den Bereich sehr hoher Lastwechselzahlen genutzt werden, die zwar baupraktisch bedeutsam sind, versuchstechnisch wegen der langen Laufzeiten jedoch nicht realisiert werden können. In den Versuchen wurden dazu Einflüsse der zyklischen Beanspruchung auf die axiale Steifigkeit durch eine hochfrequente Messung des Last-Längsverformungs-Verhaltens erfasst.

Mit diesen Messungen kann weitgehend gleichwertig zu alternativen Messverfahren wie der Ultraschall-Laufzeitmessung oder der Schallemissionsanalyse der durch zyklische Wechselbelastung hervorgerufene Schädigungsfortschritt erfasst werden (Holmen 1979). Für die hier betrachtete Wechselbeanspruchung musste hierzu der Bereich der Zug- und der Druckbeanspruchung innerhalb eines Lastzyklus getrennt betrachtet werden. Auch die Lage der Grenzlinien zwischen Brucharten ist zu beachten.

Neben den Parametern Unterspannung und Spannungsschwingbreite wurde mit dem Luftporengehalt ein weiterer potentieller Einflussfaktor auf die Ermüdungsfestigkeit untersucht. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Untersuchungen von (de Antrim, McLaughlin 1959) zum Ermüdungsverhalten von Luftporenbeton zeichnete sich dieser Parameter in der ersten Förderperiode als relevant insbesondere für das Zugversagen ab.

In der zweiten Förderperiode wurde ferner die Gültigkeit der für normalfesten und hochfesten Beton näherungsweise angenommenen Unabhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit von der Betonzusammensetzung für UHPC überprüft. Dazu wurde das Ermüdungsverhalten von grobkörnigem UHPC untersucht. Die für diese Untersuchung vorgesehenen Prüfkörper wurden mit der Rezeptur B5Q, die während der ersten Förderperiode aus einer grobkörnigen Rezeptur entwickelt wurde, hergestellt. Eine enge Abstimmung beim Mischregime erfolgte mit dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der Technischen Universität München. Am cbm wurde im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Nachhaltiges Bauen mit Ultra-Hochfestem Beton (UHPC)“ ein Forschungsvorhaben zur Optimierung von UHPC-Rezepturen im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften (unter statischen Lasten) durchgeführt.

Für das Versuchsprogramm mit der grobkörnigen Mischung B5Q wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt. In den Hauptversuchen wurde an UHPC-Körpern ebenso ein für die Baupraxis relevantes Spektrum der möglichen Kombinationen (σ_u , σ_o) untersucht.

Aus den Ergebnissen der Wöhlerversuche werden durch statistische Methoden Ansätze für Wöhlerlinien des Wechselbereichs und insbesondere auf Lastwechselzahlen bezogene Grenzlinien in Goodman- Diagrammen abgeleitet. Zunächst musste überprüft werden, ob auch für wechselbeanspruchten UHPC eine Darstellung der Wöhlerlinien als Gerade in einfachlogarithmischem Maßstab zutreffend ist. Darüber hinaus war zu klären, ob analog zu Normalbeton eine Rückführung der Streuungen der Ermüdungsfestigkeit auf die Streuung der zugehörigen Kennwerte unter statischer Kurzzeitbeanspruchung im Hinblick auf die Ableitung charakteristischer Werte der Ermüdungsfestigkeit ausreicht. Die Prüfung einer großen Bandbreite der Ober- und Unterspannungen lässt zudem Aussagen über den Bereich eines Bruchartwechsels vom Druck- zum Zugversagen zu.

3.2 Konzeption der Versuchsserien für die feinkörnige UHPC-Mischung M2Q bzw. M3Q

In den Versuchsserien der zyklischen Ermüdungsversuche wurden die folgenden Parameter untersucht:

- Einfluss von Unterspannung und Schwingbreite
- Einfluss der Fasern
 - ohne Fasern
 - mit Fasern, Orientierung vorwiegend parallel zur Körperachse
 - mit Fasern, Orientierung vorwiegend senkrecht zur Körperachse
- Wärmebehandlung
 - ohne Wärmebehandlung (nach Ausschalen 7d Wasserlagerung, anschließend Lagerung in annähernd Normklima (20°C, 65% RH), Prüfung analog)

- mit Wärmebehandlung (nach Ausschalen Autoklavierung bei 90°C 48h; anschließend Lagerung und Prüfung wie oben)

Die Faserorientierung wurde durch die Herstellung der Prüfkörper in horizontal („liegend“) bzw. vertikal („stehend“) gestellten Schalungen beeinflusst. Eine Überprüfung der Faserorientierung erfolgte stichpunktartig anhand geprüfter Prismen durch eine optische Analyse von Schnitten senkrecht zur Prismenachse. Des Weiteren erfolgte nach Abschluss der ersten Förderperiode eine ausführliche Auswertung der Faserorientierung mit Hilfe einer speziellen Software („Elli-Faserdetektion“ entwickelt von Johannes Lange vom Lehrstuhl für Geodäsie an der RWTH Aachen). Die Auswertung und die Ergebnisse dieser Untersuchung werden zu späterem Zeitpunkt näher erläutert.

Vor dem Hintergrund der zu erwartenden Versuchsdauer in Kombination mit den für eine statistische Auswertung als erforderlich erachteten fünf Versuche je Parameterkombination wurden einige Einflussparameter mit eingeschränkter Bandbreite der Kombinationen von Ober- und Unterspannung untersucht. Die vier Versuchsreihen der ersten Förderperiode gliederten sich wie folgt:

- Reihe 1 (OF): Versuche zum Ermüdungsverhalten von UHPC ohne Fasern
(Parameter: UHPC M2Q ohne beigegebenen Fasern, liegend hergestellt, wärmebehandelt)
- Reihe 2 (HV): Hauptversuche 1. Förderperiode
(Parameter: UHPC M2Q mit beigegebenen Fasern, liegend hergestellt, wärmebehandelt)
- Reihe 3 (FO): Versuche zum Einfluss der Faserorientierung
(Parameter: UHPC M2Q mit beigegebenen Fasern, stehend hergestellt, wärmebehandelt)
- Reihe 4 (WB): Versuche zum Einfluss der Wärmebehandlung
(Parameter: UHPC M2Q mit beigegebenen Fasern, liegend hergestellt, nicht wärmebehandelt)

Da zu erwarten war, dass UHPC ähnlich Normalbeton unter zyklischen Beanspruchungen keine Dauerfestigkeit im klassischen Sinne aufweist, zudem eine deutliche Mittelspannungsabhängigkeit besteht, konnte für eine systematische Versuchsplanung nicht auf die u. a. in (Buxmann et al. 1992) und (Haibach 2006) zusammengestellten Verfahren, z.B. Treppenstufenverfahren, PROBIT-Verfahren, o. ä., zurückgegriffen werden. Das in (DAfStb 2003a) vorgestellte „Interaktive Verfahren“ wäre zwar grundsätzlich geeignet, erfordert allerdings eine iterative Festlegung der unterschiedlichen geprüften Schwingbreiten und lässt damit nur eingeschränkt Aussagen über die Streuungen z.B. im Hinblick auf die Steifigkeitsabnahme zu. Die Festlegung zu prüfender Schwingbreiten und zugeordneter Mittelspannungen bzw. Unter- und Oberspannung (σ_u , σ_o) baute daher auf der Darstellung der Ermüdungsfestigkeit für definierte Lastwechselzahlen (Vertikalschnitte des Wöhlerdiagramms) in einem Goodman-Diagramm auf.

In Bild 3.1 sind die untersuchten Beanspruchungskombinationen in der ersten Förderperiode für die Versuche mit der UHPC Mischung M2Q markiert. Zusätzlich sind die Beanspruchungskombinationen für die begleitenden Versuchsreihen OF, FO und WB dargestellt.

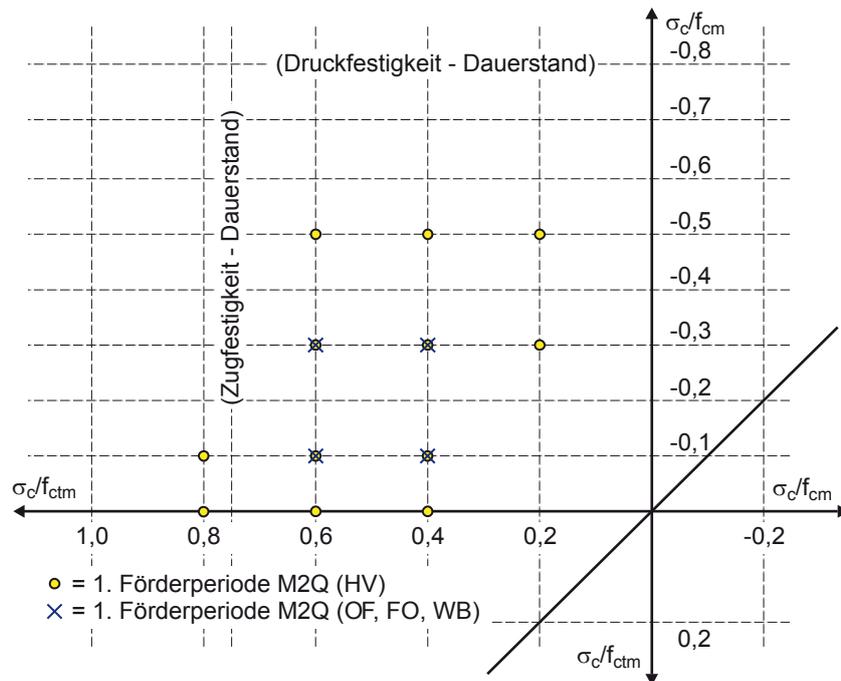


Bild 3.1: Untersuchte Kombinationen (σ_u , σ_o) der 1. Förderperiode (M2Q)

Der für die experimentellen Untersuchungen relevante Bereich wurde durch die Festigkeiten unter Dauerlasten begrenzt. Für UHPC liegen derzeit weder für die Druck- noch für die Zugfestigkeit unter langandauernden Lasten gesicherte Werte vor. Als Anhaltswerte werden die für hochfesten Beton ermittelten Kenngrößen herangezogen. Für Zugbeanspruchungen wurde in umfassenden Untersuchungen (vgl. DAfStb 2003b) ein angenäherter Grenzwert von 75% der statischen Zugfestigkeit ermittelt. Die Druckfestigkeit von HPC unter langandauernden Lasten beträgt ca. 80% der statischen Druckfestigkeit. Aus UHPC gefertigte vorgespannte Zugglieder werden bei wirtschaftlicher Auslegung der Vorspannung i. Allg. eine Unterspannung $|\sigma_u| = 0,5 \cdot f_{ctm}$ nicht unterschreiten. Mit diesen Randbedingungen ergab sich der in Bild 3.1 dargestellte zu untersuchende Bereich. Mit den Versuchen sollte vor dem Hintergrund eines vereinfachten Nachweises der Ermüdung gleichzeitig der Bereich der Zugspannungsbelastungen als konservative Abgrenzung der möglichen Zugschwellbeanspruchungen abgedeckt werden. Die Überprüfung der Grenzen des baupraktisch relevanten Bereichs erübrigt eine, bei der vorgesehenen Anzahl von jeweils 5 Versuchen je Parameterkombination kritisch zu hinterfragende Extrapolation.

Versuche im Druckursprungsbereich wurden nicht vorgesehen, da entsprechende Untersuchungen im Schwerpunktprojekt Gr1857/4-1 „Ermüdung von UHPC unter ein- und mehraxialer Beanspruchung“ durchgeführt werden sollen.

Aufgrund der Ergebnisse und der neuen UHPC Mischung M3Q wurden die durchgeführten Versuche während der zweiten Förderperiode durch weitere Beanspruchungskombinationen ergänzt. Die zusätzlichen Beanspruchungskombinationen sind im Bild 3.2 dargestellt. Zwei Versuchsreihen wurden an bereits untersuchten Beanspruchungskombinationen wiederholt um einen Vergleich des Ermüdungsverhaltens der beiden Mischungen zu erhalten.

Die Versuchsreihe lautet wie folgt:

- Reihe 5 (MHV): Hauptversuche 2. Förderperiode
(Parameter: UHPC M3Q mit beigegebenen Fasern, liegend hergestellt, wärmebehandelt)

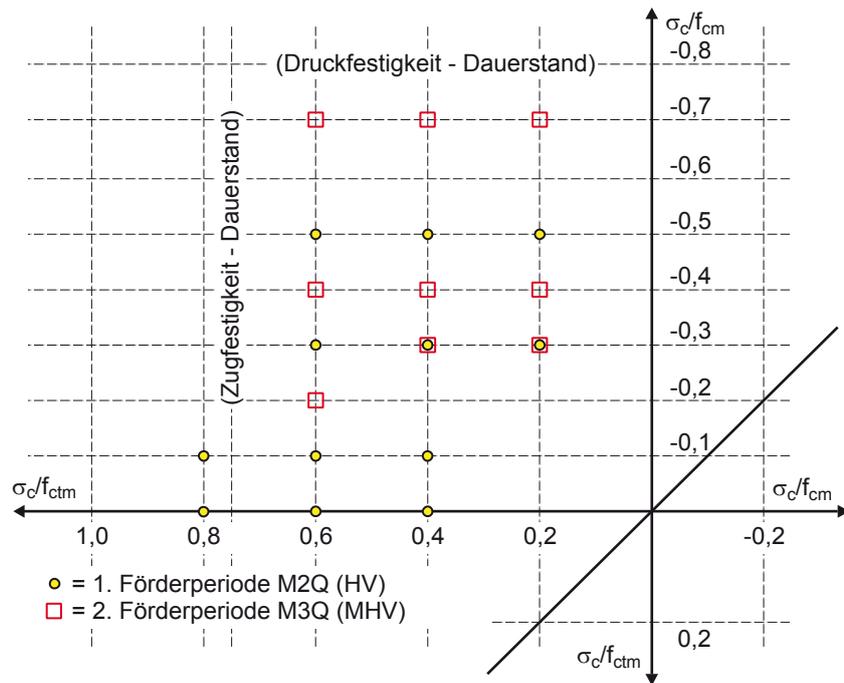


Bild 3.2: Untersuchte Kombinationen (σ_u , σ_o) der 1. und 2. Förderperiode (M2Q und M3Q)

Eine Zusammenstellung der durchgeführten Versuche unter zyklischer Beanspruchung im Zugursprungs- und Wechselbereich enthält Tabelle 3.1. Die experimentellen Untersuchungen umfassten in der Reihe der Hauptversuche (HV) 60 Versuche, in den drei ergänzenden Versuchsreihen (OF, FO, WB) jeweils 20 Versuche. In der zweiten Förderperiode wurden 45 zusätzliche Versuche (MHV) durchgeführt. Insgesamt wurden somit 165 Ermüdungsversuche mit der feinkörnigen UHPC-Mischung durchgeführt.

Tabelle 3.1: Übersicht über die durchgeführten Versuche mit zyklischer Zugursprungs- und Wechselbeanspruchung in der 1. und 2. Förderperiode (M2Q und M3Q)

Unter- spannung σ_u/f_{ctm} ($\sigma < 0$)	Oberspannung σ_o/f_{ctm} ($\sigma > 0$)				Anzahl				
	0,2 A	0,4 B	0,6 C	0,8 D	OF	M2Q HV	FO	WB	M3Q MHV
0,0 0	-	HV	HV	HV	-	15	-	-	-
-0,1 1	-	OF|HV|FO|WB	OF|HV|FO|WB	HV	10	15	10	10	-
-0,2 2	-	-	MHV	-	-	-	-	-	5
-0,3 3	HV|MHV	OF|HV|FO|WB|MHV	OF|HV|FO|WB	-	10	15	10	10	10
-0,4 4	MHV	MHV	MHV	-	-	-	-	-	15
-0,5 5	HV	HV	HV	-	-	15	-	-	-
-0,6 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-0,7 7	MHV	MHV	MHV	-	-	-	-	-	15

3.3 Konzeption der Versuchsserie für die grobkörnige UHPC-Mischung B5Q

In einer weiteren Versuchsreihe wurde das Ermüdungsverhalten der grobkörnigen UHPC-Mischung untersucht. Mit kraftgesteuerten, einstufigen Wöhlerversuchen wurde im Vergleich zu den Versuchen mit der Mischung M2Q der Einfluss der Betonzusammensetzung untersucht. Die Versuche erfuhren analog zu der ersten Förderperiode eine Wärmebehandlung (48h bei 90°C) und wurden liegend mit Stahlfasern hergestellt.

Die Versuchsreihe lautet wie folgt:

Reihe 6 (BHV): Hauptversuche 2. Förderperiode
 (Parameter: UHPC B5Q mit beigegebenen Fasern,
 liegend hergestellt, wärmebehandelt)

In Bild 3.3 sind die untersuchten Beanspruchungskombinationen dargestellt. Es wurden an jeder Beanspruchungskombination je fünf UHPC-Körper untersucht.

Die Versuche orientierten sich an den mit der Rezeptur M2Q durchgeführten Untersuchungen und enthalten bereits weitere Lastkombinationen der zweiten Förderperiode, um einen Vergleich der verschiedenen zusammengesetzten Mischung zu ermöglichen. Eine Zusammenstellung der durchgeführten Versuche mit der Rezeptur B5Q unter zyklischer Beanspruchung im Wechselbereich enthält Tabelle 3.2. Die experimentellen Untersuchungen umfassten in der Reihe der Hauptversuche (BHV) 50 Versuche.

Insgesamt wurden in der ersten und der zweiten Förderperiode 215 Ermüdungsversuche durchgeführt.

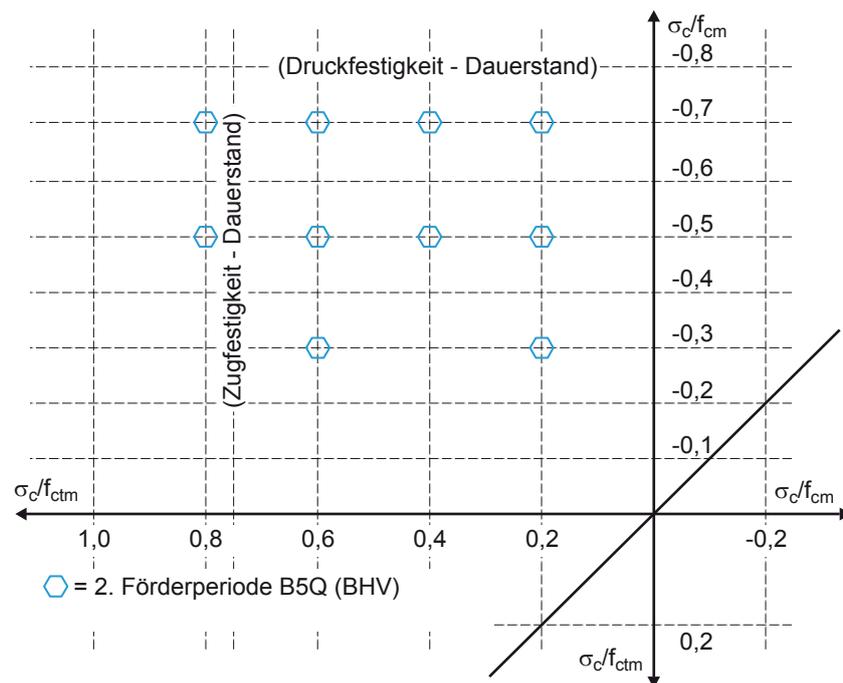


Bild 3.3: Untersuchte Kombinationen (σ_u , σ_o) der 2. Förderperiode (B5Q)

Tabelle 3.2: Übersicht über die durchgeführten Versuche mit zyklischer Wechselbeanspruchung in der 2. Förderperiode (B5Q)

Unter- spannung σ_u/f_{ctm} ($\sigma < 0$)		Oberspannung σ_o/f_{ctm} ($\sigma > 0$)				Anzahl B5Q BHV
		0,2 A	0,4 B	0,6 C	0,8 D	
0,0	0	-	-	-	-	-
-0,1	1	-	-	-	-	-
-0,2	2	-	-	-	-	-
-0,3	3	BHV	-	BHV	-	10
-0,4	4	-	-	-	-	-
-0,5	5	BHV	BHV	BHV	BHV	20
-0,6	6	-	-	-	-	-
-0,7	7	BHV	BHV	BHV	BHV	20

4 Prüfkörper

4.1 Zusammensetzung des ultrahochfesten Betons

In den Versuchen wurde das Ermüdungsverhalten für die Rezeptur M2Q (UHPC ohne und mit Fasern), die Rezeptur M3Q (M2Q mit anderem Mikrosilika) und die Rezeptur B5Q bestimmt. Die Rezeptur M2Q orientierte sich an der u. a. in (Fehling et al. 2005) genannten Rezeptur. Zum Ende der ersten Förderperiode wurde bekannt, dass das bisher verwendete Mikrosilika nicht mehr hergestellt wird. Daher wurde im Rahmen des Schwerpunktprogramms ein neues Mikrosilika festgelegt und als neue UHPC-Mischung M2Qneu bzw. M3Q in das Programm aufgenommen. Des Weiteren wurde die Rezeptur B5Q, die während der ersten Förderperiode aus einer grobkörnigen Rezeptur entwickelt wurde, verwendet um den Einfluss der Betonzusammensetzung auf das Ermüdungsverhalten zu untersuchen. Die Auswahl der Rezeptur M2Q ohne Fasern erfolgte in enger Abstimmung mit dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der Technischen Universität München (Prof. Schießl). Am cbm wurde im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1182 „Nachhaltiges Bauen mit Ultra-Hochfestem Beton (UHPC)“ ein Forschungsvorhaben zur Optimierung von UHPC-Rezepturen im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften durchgeführt. Die Tabelle 4.1 zeigt die Zusammensetzung der Rezepturen M2Q für UHPC mit und ohne Fasern, M3Q und B5Q. Die Probekörper wurden anfänglich am cbm hergestellt. Nach ausreichender Erfahrung wurde die Herstellung, auch aus Lagerungsgründen, in das Materialprüfungsamt für das Bauwesen (MPA BAU) der Technischen Universität München, Abteilung Massivbau verlagert und an einem Eirich Mischer, Typ EA44, Bj. 1954 (Mischervolumen 50 l) durchgeführt.

Tabelle 4.1: Mischungszusammensetzung für die Rezeptur M2Q, M3Q und B5Q (in kg/m³)

Rohstoff	Bezeichnung	M2Q	M2Q	M3Q	B5Q
		ohne Fasern	mit Fasern	mit Fasern	mit Fasern
Zement	CEM I 52,5 R - HS/NA	855,0	832,0	814,0	650,0
Wasser	Wasser	174,0	169,0	160,0	158,0
Zusatzstoff	Silikastaub Grade 983	139,0	135,0	-	-
	Silikastaub Grade 971 U	-	-	132,0	-
	Silikastaub Sika Silicol P	-	-	-	177,0
	Quarzmehl (QM1) W12	213,0	207,0	203,0	325,0
	Quarzmehl (QM2) W3	-	-	-	131,0
Zusatzmittel	Glenium 51	25,0	24,0	32,6	-
	VisoCrete 20 Gold	-	-	-	30,4
Zuschlag	Quarzsand H33	1002,0	975,0	954,0	354,0
	Basalt 2/8	-	-	-	597,0
Fasern	Stahlfasern Stratec l/d=9/0,15	-	192,0	196,0	192,0

Die Konsistenz des Frischbetons wurde bei jeder Betonage durch das Ausbreitmaß bestimmt. Das Ausbreitmaß betrug in der Regel für die Rezeptur M2Q mit und ohne Fasern 700-800 mm und war somit im erwartenden Bereich. Das Ausbreitmaß für die Rezeptur M3Q und B5Q betrug 600-700 mm. Zusätzlich wurde die Frischbetonrohddichte, der Luftporengehalt, die Lufttemperatur, Wassertemperatur und die Temperatur der Zuschläge bestimmt. Der UHPC mit Fasern wurde nach folgendem Regime (für normale Zwangsmischer) gemischt:

- Zugabe aller Trockenstoffe: 0.-60. Sekunde

- Zugabe Wasser und halbe Menge des Fließmittels (gemischt zugeben): 61.-120. Sekunde
- Mischen: 121.-420. Sekunde
- Pause: 421.-540. Sekunde
- Zugabe des restlichen Fließmittel: 541.-600. Sekunde
- Zugabe Stahlfasern: 601.-660. Sekunde
(hier entscheidet der optische Eindruck im Mischer, abhängig von der Mischintensität)
- Mischen: ca. 120 Sekunden

Die gesamte Mischzeit betrug ca. 13 Minuten pro Mischung. Um die Festbetoneigenschaften zu überprüfen wurden Zylinder zur Druckfestigkeitsbestimmung und Prismen für die Biegezugfestigkeit angefertigt. Anschließend wurden die Schalungsformen befüllt und die Prüfkörper verdichtet.

4.2 Geometrie der Prüfkörper

Bereits in (Rüsch, Hilsdorf 1963) sind statische Zugversuche an ungekerbten prismatischen Körpern beschrieben. Eine Übersicht einiger bisher verwendeten Prüfkörper bei statischen Zugversuchen ist dem Bild 4.1 zu entnehmen. Die Übersicht zeigt, dass bisher Prüfkörper mit einer Höhe von 180 mm (Markovic 2006) bis 740 mm (Saito 1984) verwendet worden sind. Des Weiteren wurden z.B. durch (Carpinteri, Ferro 1994) Prüfkörper verwendet, die im Stegbereich keine konstante Länge aufweisen. Die meisten Prüfkörper besitzen zudem einen geraden Lasteinleitungsbereich an den beiden Enden (u. a. (Hughes, Chapman 1966), (Naaman, Homrich 1989), (Behloul et al. 1996), (Brameshuber, Brockmann 2003)). Die Prüfkörper aus (Betterman et al. 1995) besitzen eine Stegbreite von lediglich 16 mm.

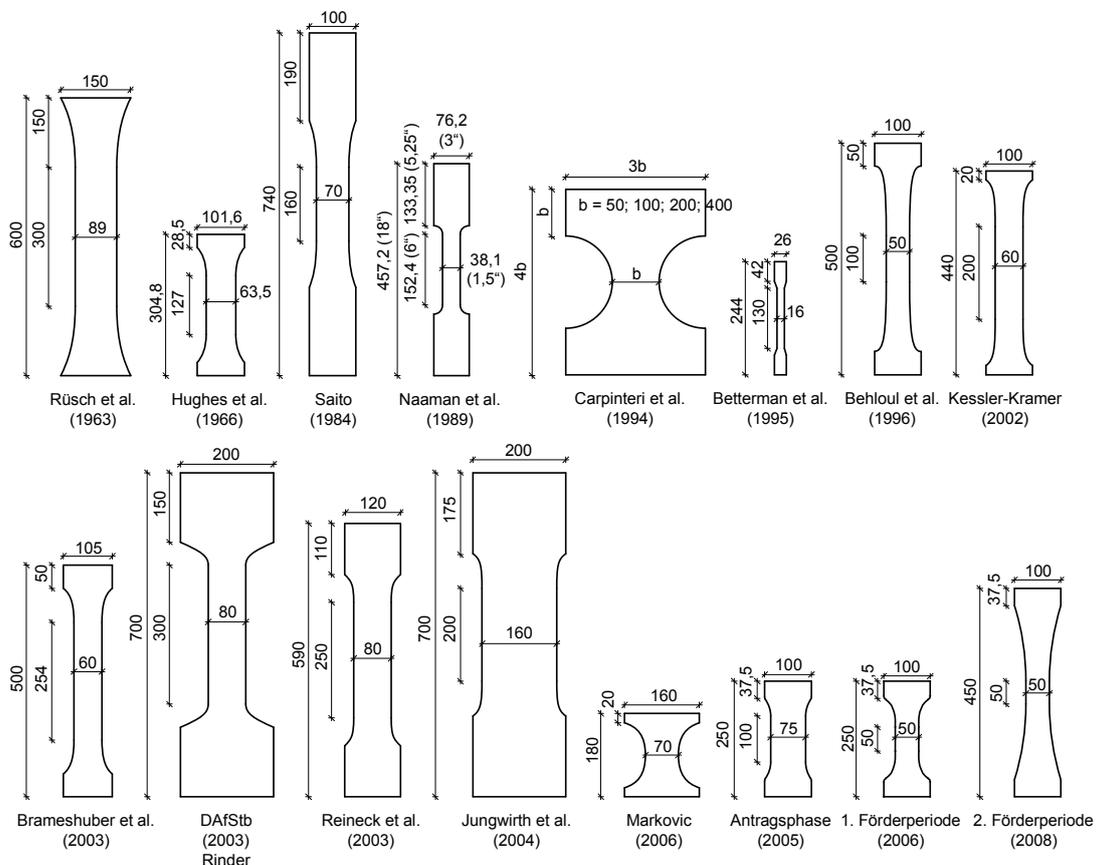


Bild 4.1: Zusammenstellung der Prüfkörperformen von einigen bisher durchgeführten Zugversuchen aus Beton (Maße in mm)

Für die eigenen Versuche wurden in Anlehnung an die bisher durchgeführten Untersuchungen während der Antragsphase ungekerbte prismatische Körper mit verstärkten Lasteinleitungsbereichen und einer Höhe von 250 mm nach Bild 4.2a vorgesehen. Die Prüfkörperabmessungen wurden jedoch nach ersten Vorversuchen geändert. Einige Vorversuche ergaben Brüche im Lasteinleitungsbereich, so dass während der ersten Förderperiode ein neuer Versuchskörper mit einem größeren Voutenradius und kleinerer Stegbreite verwendet worden ist (s. Bild 4.2b).

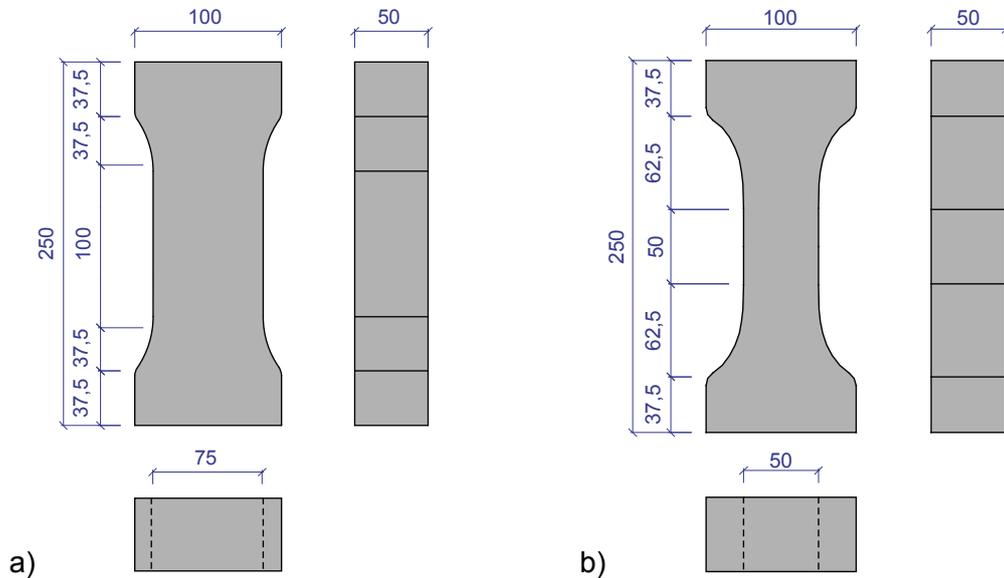


Bild 4.2: a) Versuchskörper für Wöhlerversuche bei Wechselbeanspruchung (Antragsphase)
b) Geänderte Prüfkörperabmessungen (Erste Förderperiode)
(Maße in mm)

In der zweiten Förderperiode wurden die Prüfkörperabmessungen noch mal verändert, um optimale Voraussetzungen für die kontinuierliche Messung der Längsverformungen, die den Schädigungsfortschritt repräsentieren, zu schaffen. Dazu wurden die bisher verwendeten Prüfkörper mit Hilfe von Finite-Element-Berechnungen modifiziert. Die neue Querschnittsgröße führte insbesondere vor dem Hintergrund des Verhältniswertes zum Größtkorndurchmesser zu repräsentativen Ergebnissen (s. Bild 4.3).

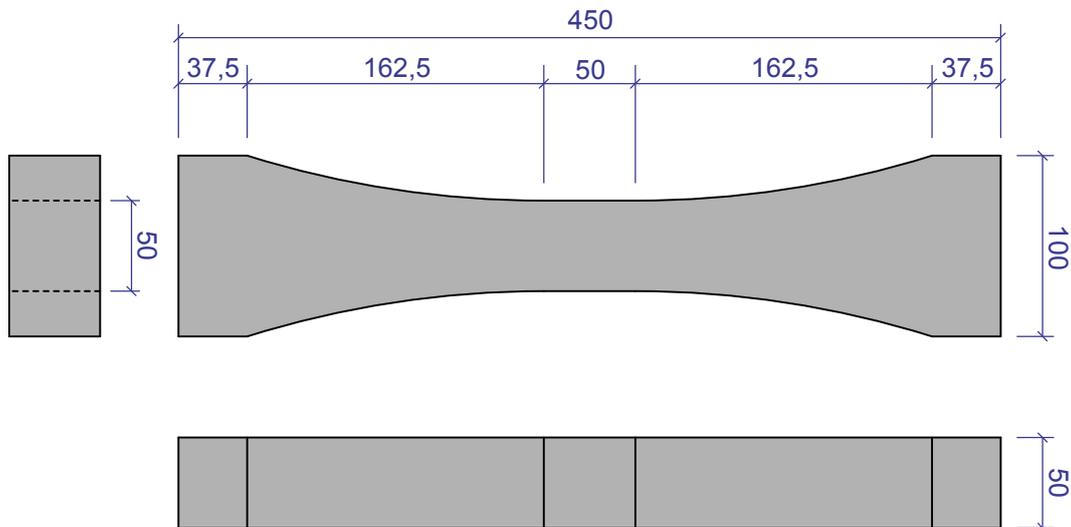


Bild 4.3: Versuchskörper für Wöhlerversuche bei Wechselbeanspruchung während der zweiten Förderperiode (Maße in mm)

Die Finite-Element-Berechnungen wurden mit der Software InfoCAD Version 8.11e der Firma InfoGraph GmbH, Aachen am linearen Werkstoff durchgeführt. Mit Hilfe der Software wurden Zugversuche simuliert und die maximalen Spannungen (σ_{\max}) und die Spannungen in Prüfkörpermitte (σ_{mitte}) ermittelt. Dabei wurden die Lasteinleitungsbereiche, die Stegbreite und die Steghöhe konstant gehalten und die Prüfkörperhöhe kontinuierlich vergrößert. Eine Übersicht über die maximalen Spannungen und die Spannungen in Feldmitte sind im Bild 4.4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei einer kleinen Prüfkörperhöhe, die maximalen Spannungen (σ_{\max}) und die Spannungen in Stegmitte (σ_{mitte}) stark voneinander abweichen. Die maximalen Spannungen treten dabei in der Voute des Prüfkörpers auf. Eine Vergrößerung des Voutenradius und der Prüfkörperhöhe verringert die maximale Spannung in der Voute und ein Bruch des Prüfkörpers in Stegmitte wird wahrscheinlicher.

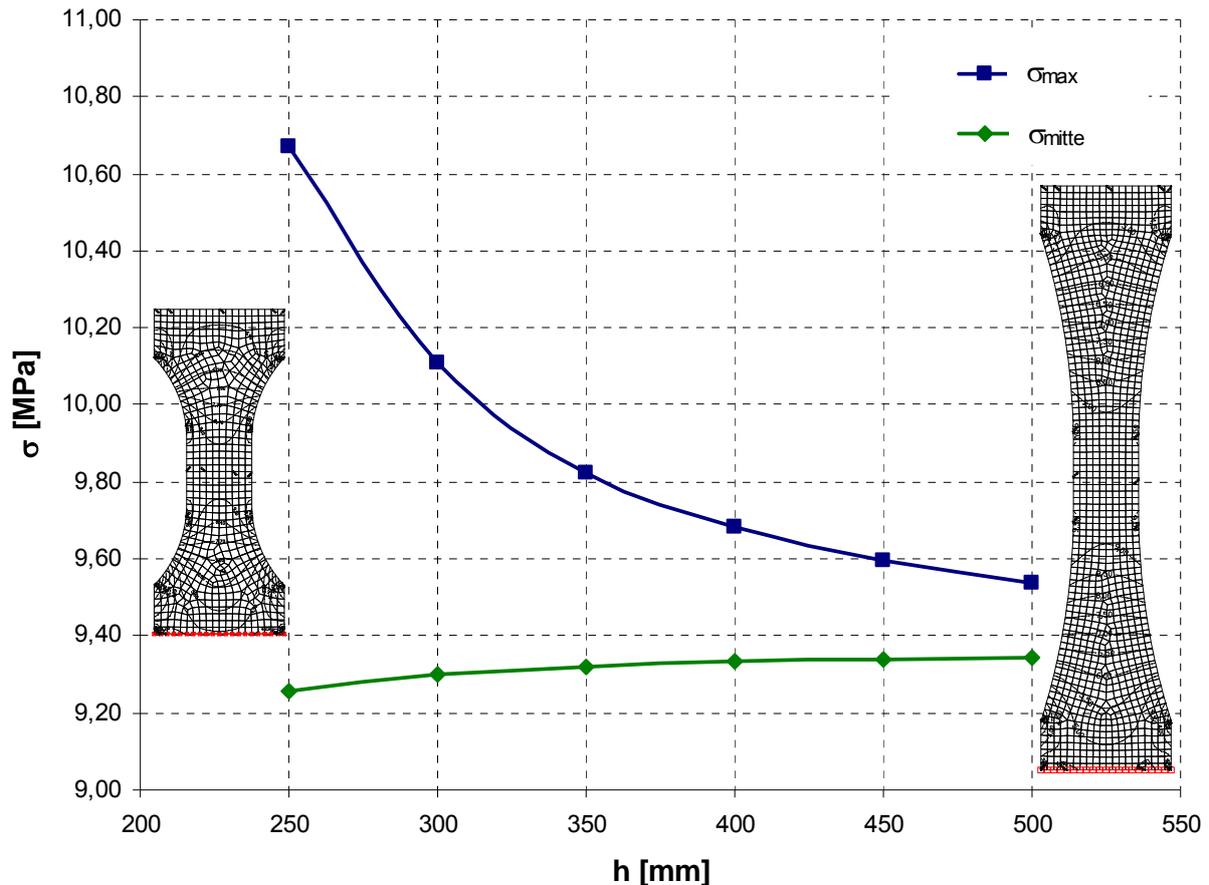


Bild 4.4: Übersicht der Ergebnisse aus den Finite-Element-Berechnungen

4.3 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper

Für die Herstellung der Prismen wurden Einzelschalungen aus dem Kunststoff POM (Polyoxymethylen), mit dem Hintergrund der Wärme- und Verschleißbeständigkeit, vorgesehen. Im Bild 4.5 sind die Schalungen der Prüfkörper aus der ersten Förderperiode dargestellt. Während der ersten Förderperiode wurden mit einer Schalung jeweils sechs Prüfkörper hergestellt. Durch die Änderung der Prüfkörperabmessungen in der zweiten Förderperiode wurden die Schalungen, wie im Bild 4.6 dargestellt, geändert.

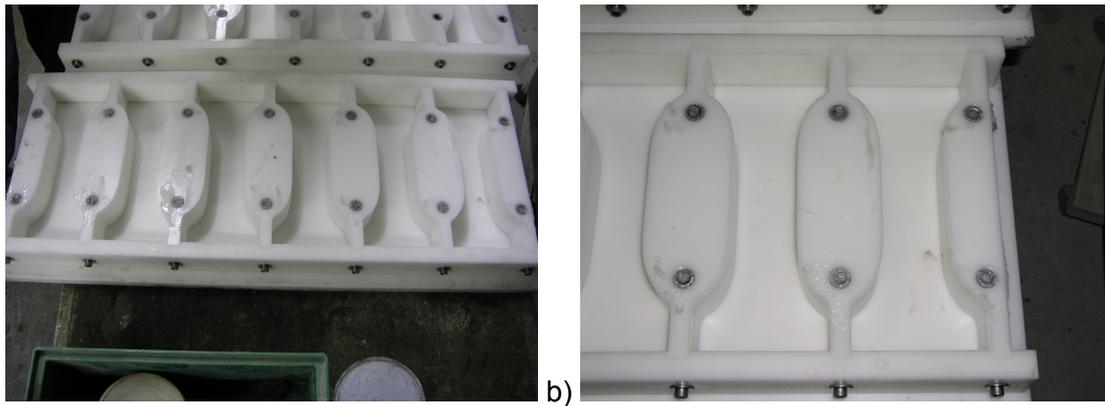


Bild 4.5: Schalung der Prüfkörper während der ersten Förderperiode aus dem Kunststoff POM

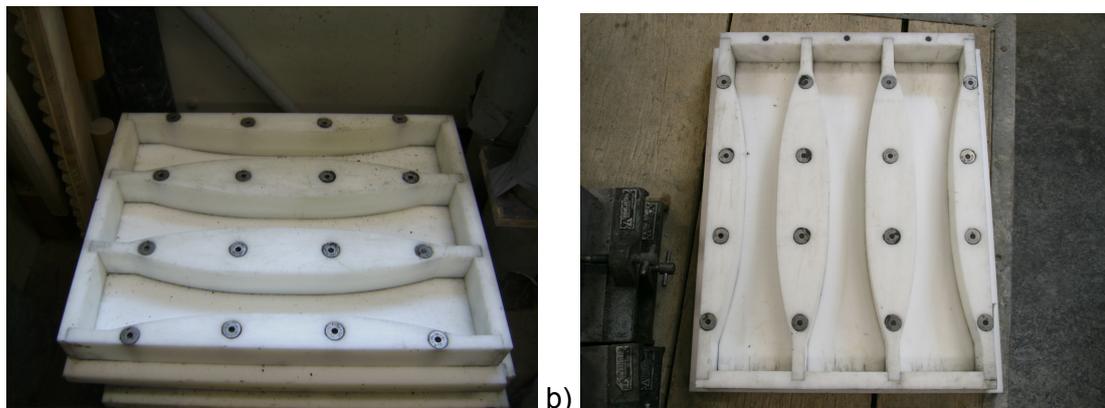


Bild 4.6: Schalung der Prüfkörper während der zweiten Förderperiode aus dem Kunststoff POM

Zwar waren durch die Herstellungsart Einflüsse aus der Anreicherung von Matrix an den Schalungswänden, sowie ggf. aus der Bildung von Defekten durch das bei UHPC signifikante autogene Schwinden zu erwarten, allerdings wurden Auswirkungen angeschnittener Fasern oder Vorschädigungen durch das Schneiden der Körper, sowie unvermeidliche Einflüsse aus ungleichmäßiger Faserverteilung und Orientierung bei der Herstellung größerer Körper vermieden.

Die bei Ermüdungsversuchen zu erwartenden signifikanten Streuungen der Ergebnisse sind u. a. auf Materialstörungen bzw. systematische oder zufällige Unterschiede bei Herstellung, Nachbehandlung, Probenvorbereitung, Prüfung, sowie auf Probenalter bzw. Nacherhärtung zurückzuführen. Die Streuungen der Ermüdungsfestigkeitswerte können teilweise durch den Bezug auf die zugehörigen statischen Festigkeitskennwerte reduziert werden. Je überprüfem Koordinatenpunkt des Goodman-Diagramms wurden fünf zyklische Versuche durchgeführt. Es wurde sichergestellt, dass die UHPC-Körper zu Beginn der zyklischen Versuche ein ähnliches Alter aufwiesen. Dem entsprechend musste die Herstellung der Versuchskörper begleitend zur Versuchsdurchführung erfolgen. Als Anhaltswerte für die Ablaufplanung wurden zunächst die von Normalbeton ertragbaren Lastwechselzahlen herangezogen.

Die Herstellung der Mischungen sowie die Betonage der Prüfkörper erfolgte am Materialprüfungsamt für das Bauwesen (MPA BAU) der Technischen Universität München, Abteilung Massivbau. Während den beiden Förderperioden konnten in ausreichendem Maße Erfahrungen gesammelt werden, so dass die Mischungen zielsicher hergestellt wurden.

Vor Beginn jeder neuen Lastkombination wurde die einaxiale Druckfestigkeit an Zylindern mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm bestimmt. Die einaxiale Zugfestigkeit der großen knochenförmigen UHPC-Körper wurde mit Hilfe von Referenzversuchen ermittelt. Dabei wurden an kleineren Versuchskörpern die einaxiale Zugfestigkeit bestimmt und die daraus ermittelten Festigkeiten mit Hilfe der zusätzlich ermittelten Biegezugfestigkeit umgerechnet.

Nach dem Ausschalen der Prüfkörper wurden die Prüfkörper, die eine Wärmebehandlung erhielten, luftdicht in Folie verpackt und 48h bei 90°C gelagert. Dabei wurden die Prüfkörper bei einer Erwärmung von 12 K/h innerhalb von 6 Stunden von 20°C auf 90°C erwärmt, 48 Stunden im Trockenschrank gelagert und danach bei halber Geschwindigkeit innerhalb von 12 Stunden wieder auf 20°C herabgekühlt. Anschließend wurden die Körper bis zur Prüfung in Folie und unter Normklima gelagert.

Prüfkörper ohne Wärmebehandlung wurden 7 Tage bei 20°C wassergelagert (oWB) und danach bis zu ihrer Prüfung bei Normklima (20°C, 65% rel. Feuchte) gelagert.

Die Referenzprüfkörper (Zylinder, kleine knochenförmige UHPC-Körper und Prismen für die Biegezugfestigkeit) erhielten je nach Versuchsserie dieselben Lagerungsbedingungen.

5 Statische Versuche

5.1 Druckfestigkeit des ultrahochfesten Betons

5.1.1 Festigkeitsentwicklung des ultrahochfesten Betons

Während des Forschungsvorhabens wurde der Erhärtungsverlauf für UHPC mit Stahlfasern und Wärmebehandlung (mSF mWB) für die Mischung M2Q, M3Q und B5Q, für UHPC mit Stahlfasern und ohne Wärmebehandlung (mSF oWB) und für UHPC ohne Stahlfasern und mit Wärmebehandlung (oSF mWB) für die Mischung M2Q bestimmt (s. Bild 5.1). Für die Festigkeitsentwicklung wurden pro Serie 24 Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm betoniert. Anschließend wurden die Druckfestigkeiten an drei Würfeln nach 1, 2, 3, 7, 14, 28, 56 und 90 Tagen ermittelt. Die Mittelwerte aus jeweils drei Würfel Druckfestigkeiten wurden für das Bild 5.1 herangezogen.

Beim Vergleich der Mischung M2Q mit Stahlfasern und mit Wärmebehandlung (mSF mWB) mit der Mischung M2Q ohne Stahlfasern und mit Wärmebehandlung (oSF mWB) ist zu erkennen, dass die Stahlfasern keinen Einfluss auf die Druckfestigkeit besitzen. Die Stahlfasern bewirken lediglich ein duktileres Verhalten, so dass die Prüfkörper beim Bruch nicht schlagartig versagen. Nach Abschluss der Wärmebehandlung wird annähernd die 28-Tage-Festigkeit des UHPC erreicht.

Im Gegensatz dazu, ist zu erkennen, dass die Druckfestigkeit für UHPC ohne Wärmebehandlung (M2Q mSF oWB) auch nach 90 Tagen nicht annähernd die Druckfestigkeit für UHPC mit Wärmebehandlung (M2Q mSF mWB) erreicht. Ohne Wärmebehandlung ist die Hydratation des UHPC nach 90 Tagen zwar abgeschlossen (asymptotisches Verhalten), jedoch wird die Festigkeitssteigerung durch das Mikrosilika ohne Wärmebehandlung nicht aktiviert.

Die genauen Ergebnisse der Würfel Druckfestigkeiten ($a = 100 \text{ mm}$) und die Mittelwerte für die verschiedenen Mischungen sind in der Anlage 12.1 dargestellt.

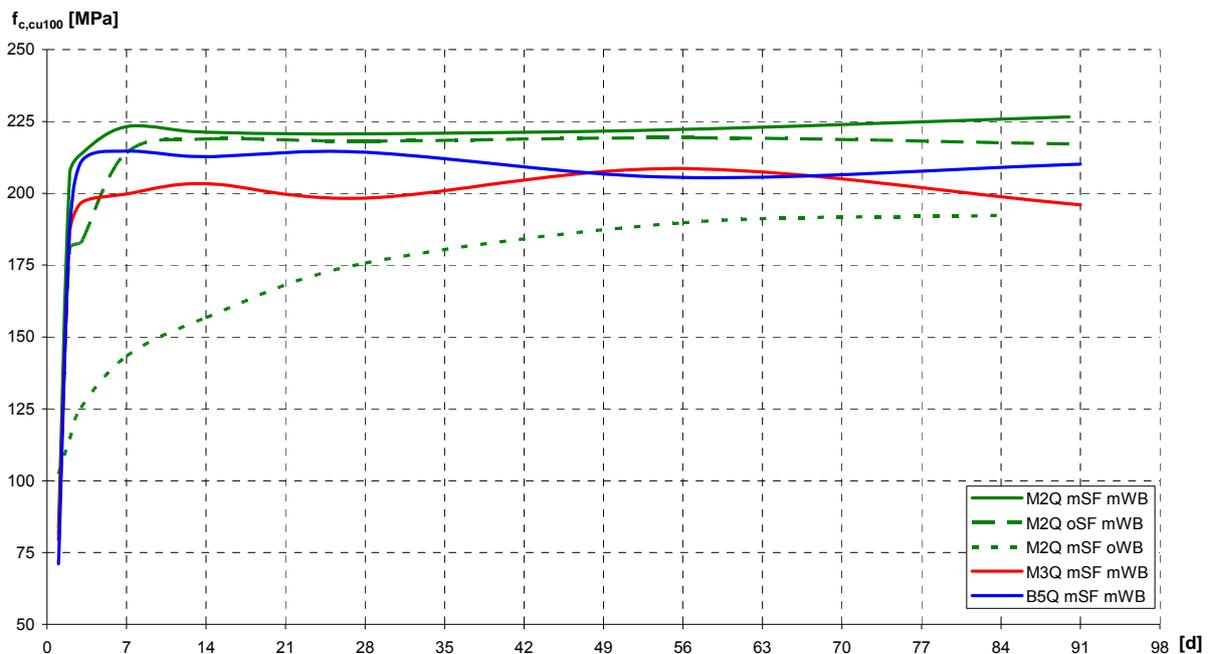


Bild 5.1: Festigkeitsentwicklung des UHPC (Mischung M2Q, M3Q und B5Q)

5.1.2 Umrechnungsbeiwerte des ultrahochfesten Betons für verschiedene Prüfkörperabmessungen

5.1.2.1 Allgemeines

Für normalfesten und hochfesten Beton wurden bereits von (Hegger et al. 1999) in einem Abschlussbericht des DIBt Umrechnungsbeiwerte definiert. Diese bereits vorhandenen Umrechnungsbeiwerte sind in der Tabelle 5.1 dargestellt. Die ermittelten Beiwerte dienen zur Umrechnung zwischen Würfeln ($a = 100 \text{ mm}$ und $a = 150 \text{ mm}$) und Zylindern ($d/h = 100/200 \text{ mm}$ und $d/h = 150/300 \text{ mm}$). Grundlage für diese Beiwerte waren Festigkeiten aus alten Versuchsberichten, die im Rahmen des Forschungsvorhabens für die Querkraftdatenbank gesammelt worden sind.

Tabelle 5.1: Bisherige Umrechnungsbeiwerte (aus Hegger et al. 1999)

$f_{\text{cm,cu}100}$		= 1,1111	$f_{\text{cm,cu}150}$	= 1,3630	$f_{\text{cm,cyl}100}$	= 1,4074	$f_{\text{cm,cyl}150}$
$f_{\text{cm,cu}150}$	= 0,9000	$f_{\text{cm,cu}100}$		= 1,2267	$f_{\text{cm,cyl}100}$	= 1,2667	$f_{\text{cm,cyl}150}$
$f_{\text{cm,cyl}100}$	= 0,7337	$f_{\text{cm,cu}100}$	= 0,8152	$f_{\text{cm,cu}150}$		= 1,0326	$f_{\text{cm,cyl}150}$
$f_{\text{cm,cyl}150}$	= 0,7105	$f_{\text{cm,cu}100}$	= 0,7895	$f_{\text{cm,cu}150}$	= 0,9684	$f_{\text{cm,cyl}100}$	

Diese Umrechnungsbeiwerte wurden in (Reineck et al. 2005) für die erweiterte Querkraftdatenbank herangezogen und mit Hilfe der neuen Datenbank überprüft. Die größere Datenmenge, darunter auch einige Versuche mit hochfestem Beton, die zur Verfügung stand ermöglichte eine neue Auswertung. Es wurde festgestellt, dass bei der Anwendung der bisherigen Umrechnungsbeiwerte für den hochfesten Beton Abweichungen auftraten und eine Korrektur für den hochfesten Beton wurde vorgeschlagen.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ergaben erste Überprüfungen, dass die bisherigen Umrechnungsbeiwerte beim ultrahochfesten Beton nicht angewendet werden können.

In einer Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München wurden für den ultrahochfesten Beton neue Umrechnungsfaktoren für die Druckfestigkeiten der unterschiedlichen Prüfkörper ermittelt. Die unterschiedlichen Ansatzmöglichkeiten und der gewählte Ansatz zur Ermittlung der Umrechnungsbeiwerte sind in (Pöllath 2009) ausführlich beschrieben. Im Folgenden werden Auszüge und die wichtigsten Ergebnisse aus (Pöllath 2009) dargestellt.

Die neuen Umrechnungsbeiwerte wurden für die zwei Rezepturen M3Q und B5Q ermittelt. Hierzu wurden am Materialprüfungsamt für das Bauwesen (MPA BAU) der Technischen Universität München, Abteilung Massivbau zwei 240 l Mischungen an einem Eirich Mischer, Typ EA44, Bj. 1954 durchgeführt. Für jede Rezeptur wurden dabei je 18 Zylinder ($d/h = 100/200 \text{ mm}$ und $150/300 \text{ mm}$) und Würfel ($a = 100 \text{ mm}$ und $a = 150 \text{ mm}$) betoniert, wobei jeweils die Hälfte der Prüfkörper eine Wärmebehandlung erhielt und die andere Hälfte 7 Tage unter Wasser gelagert wurde.

Die Festigkeiten der Prüfkörper wurden nach 7, 28 und 90 Tagen bestimmt und anschließend mit Hilfe der Statistik (Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten) ausgewertet.

Voruntersuchungen haben ergeben, dass keine direkte Abhängigkeit zwischen der Festbetonrohichte und der zentrischen Druckfestigkeit besteht. Unterschiede bzw. Streuungen in den Druckfestigkeiten sind auf lokale Störungen und die unterschiedlichen Prüfkörpergeometrien zurückzuführen. Es erscheint dennoch richtig die Festbetonrohichte bei der Berechnung der Umrechnungsbeiwerte mit einzubeziehen. Die Umrechnungsbeiwerte werden

mit Hilfe der auf die Festbetonrohddichte normierten Mittelwerte der Druckfestigkeiten ermittelt. Dafür werden die Druckfestigkeiten der einzelnen Prüfkörper mit der jeweiligen Festbetonrohddichte multipliziert und durch die mittlere Festbetonrohddichte dividiert.

5.1.2.2 Umrechnungsbeiwerte für M3Q mSF oWB

Für die Auswertung der Umrechnungsbeiwerte der feinkörnigen Mischung ohne Wärmebehandlung standen pro Prüfkörpertyp und Alter drei Druckfestigkeiten zur Verfügung.

Die ermittelten Druckfestigkeiten und die dazugehörigen Standardabweichungen sind in der Tabelle 5.2 dargestellt. Wie zu erwarten war, sind die Standardabweichungen bei den Druckfestigkeiten gering. Die Standardabweichungen der Würfeldruckfestigkeiten mit einer Kantenlänge von 100 mm (nach 90 Tagen) sind dabei am geringsten.

Die mittlere Festbetonrohddichte beträgt $\rho_{m,M3Q,mSF,oWB} = 2,4850 \text{ kg/dm}^3$ bei einer Standardabweichung von $s_x = 0,0135 \text{ kg/dm}^3$ ($v_x = 0,54\%$).

Tabelle 5.2: Druckfestigkeiten und Standardabweichungen für die Serie M3Q mSF oWB (in MPa)

	f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}	f_{cm}	s_x	v_x (in %)
$f_{c,cu100,7d}$	134,0	122,0	128,1	128,0	6,0	4,7
$f_{c,cu150,7d}$	125,2	130,7	129,3	128,4	2,9	2,3
$f_{c,cyl100,7d}$	114,7	116,5	117,7	116,3	1,5	1,3
$f_{c,cyl150,7d}$	108,3	110,8	111,6	110,2	1,7	1,5
$f_{c,cu100,28d}$	171,0	167,2	164,9	167,7	3,1	1,8
$f_{c,cu150,28d}$	155,5	160,5	159,6	158,5	2,7	1,7
$f_{c,cyl100,28d}$	143,9	151,1	157,8	150,9	7,0	4,6
$f_{c,cyl150,28d}$	155,1	153,4	145,1	151,2	5,3	3,5
$f_{c,cu100,90d}$	178,0	177,8	178,1	178,0	0,2	0,1
$f_{c,cu150,90d}$	178,4	167,0	170,0	171,8	5,9	3,5
$f_{c,cyl100,90d}$	143,8	156,8	164,9	155,2	10,7	6,9
$f_{c,cyl150,90d}$	156,6	150,0	161,3	156,0	5,7	3,7

Aus den Druckfestigkeiten wurden für die 28-Tage-Festigkeit die Umrechnungsbeiwerte ermittelt. Die Tabelle 5.3 zeigt die Umrechnungsbeiwerte für die Rezeptur M3Q mit Stahlfasern und ohne Wärmebehandlung nach 28 Tagen. Auffallend ist, dass die Umrechnungsbeiwerte zwischen ca. 0,9 und 1,1 liegen. Die mittlere Druckfestigkeit eines kleinen Zylinders entspricht in etwa der mittleren Druckfestigkeit eines größeren Zylinders. Ähnliche Tendenzen sind auch bei der grobkörnigen Mischung festzustellen.

Tabelle 5.3: Umrechnungsbeiwerte für M3Q mSF oWB

$f_{cm,cu100}$		= 1,0696	$f_{cm,cu150}$	= 1,1140	$f_{cm,cyl100}$	= 1,1244	$f_{cm,cyl150}$
$f_{cm,cu150}$	= 0,9349	$f_{cm,cu100}$		= 1,0415	$f_{cm,cyl100}$	= 1,0512	$f_{cm,cyl150}$
$f_{cm,cyl100}$	= 0,8976	$f_{cm,cu100}$	= 0,9601	$f_{cm,cu150}$		= 1,0093	$f_{cm,cyl150}$
$f_{cm,cyl150}$	= 0,8893	$f_{cm,cu100}$	= 0,9513	$f_{cm,cu150}$	= 0,9908	$f_{cm,cyl100}$	

5.1.2.3 Umrechnungsbeiwerte für M3Q mSF mWB

Die Druckfestigkeiten und die dazugehörigen Standardabweichungen für die feinkörnige Mischung mit Wärmebehandlung sind in der Tabelle 5.4 dargestellt. Die Standardabweichungen bei den Druckfestigkeiten sind bis auf die Würfeldruckfestigkeiten mit einer Kantenlänge von 150 mm (nach sieben Tagen) gering. Die geringsten Standardabweichungen wurden bei den Würfeldruckfestigkeiten mit einer Kantenlänge von 100 mm (nach sieben Tagen) festgestellt.

Die mittlere Festbetonrohichte beträgt $\rho_{m,M3Q,mSF,mWB} = 2,4682 \text{ kg/dm}^3$ bei einer Standardabweichung von $s_x = 0,0183 \text{ kg/dm}^3$ ($v_x = 0,74\%$).

Tabelle 5.4: Druckfestigkeiten und Standardabweichungen für die Serie M3Q mSF mWB (in MPa)

	f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}	f_{cm}	s_x	v_x (in %)
$f_{c,cu100,7d}$	188,1	191,3	185,6	188,3	2,8	1,5
$f_{c,cu150,7d}$	187,9	182,8	177,5	182,7	5,2	2,8
$f_{c,cyl100,7d}$	167,5	177,2	179,5	174,7	6,3	3,6
$f_{c,cyl150,7d}$	160,0	185,4	163,2	169,5	13,8	8,2
$f_{c,cu100,28d}$	192,6	207,1	189,1	196,2	9,6	4,9
$f_{c,cu150,28d}$	194,4	188,5	188,0	190,3	3,5	1,9
$f_{c,cyl100,28d}$	183,3	185,7	178,0	182,3	3,9	2,2
$f_{c,cyl150,28d}$	175,8	179,1	172,0	175,6	3,5	2,0
$f_{c,cu100,90d}$	195,9	199,3	191,5	195,6	3,9	2,0
$f_{c,cu150,90d}$	196,3	186,6	181,6	188,2	7,5	4,0
$f_{c,cyl100,90d}$	160,0	173,4	158,6	164,0	8,1	5,0
$f_{c,cyl150,90d}$	174,4	181,9	174,6	177,0	4,3	2,4

Im Vergleich zu den Versuchsergebnissen ohne Wärmebehandlung ist festzustellen, dass durch die Wärmebehandlung die Druckfestigkeit nach sieben Tagen nahezu die 28-Tage-Festigkeit erreicht. Des Weiteren ist ein leichter Abfall der Druckfestigkeit nach 90 Tagen (im Vergleich zur 28-Tage-Festigkeit) festzustellen. Dieser Abfall ist beim UHPC nur bei einer Wärmebehandlung festzustellen.

Die Tabelle 5.5 zeigt die Umrechnungsbeiwerte für die Rezeptur M3Q mit Stahlfasern und mit Wärmebehandlung nach 28 Tagen. Ebenso wie bei den Prüfkörpern ohne Wärmebehandlung ist festzustellen, dass die Umrechnungsbeiwerte zwischen ca. 0,9 und 1,1 liegen. Die Tendenz der Umrechnungsbeiwerte ist ähnlich der bisherigen Umrechnungsbeiwerte.

Tabelle 5.5: Umrechnungsbeiwerte für M3Q mSF mWB

$f_{cm,cu100}$		= 1,0372	$f_{cm,cu150}$	= 1,0809	$f_{cm,cyl100}$	= 1,1322	$f_{cm,cyl150}$
$f_{cm,cu150}$	= 0,9641	$f_{cm,cu100}$		= 1,0421	$f_{cm,cyl100}$	= 1,0916	$f_{cm,cyl150}$
$f_{cm,cyl100}$	= 0,9252	$f_{cm,cu100}$	= 0,9596	$f_{cm,cu150}$		= 1,0475	$f_{cm,cyl150}$
$f_{cm,cyl150}$	= 0,8832	$f_{cm,cu100}$	= 0,9161	$f_{cm,cu150}$	= 0,9546	$f_{cm,cyl100}$	

5.1.2.4 Umrechnungsbeiwerte für B5Q mSF oWB

Für die Auswertung der Umrechnungsbeiwerte der grobkörnigen Mischung ohne Wärmebehandlung standen pro Prüfkörpertyp und Alter drei Druckfestigkeiten zur Verfügung.

Die Druckfestigkeiten und die dazugehörigen Standardabweichungen sind in der Tabelle 5.6 dargestellt. Die größten Standardabweichungen sind bei den Würfeldruckfestigkeiten nach 28 Tagen ($a = 150 \text{ mm}$) und die geringsten bei den Zylinderdruckfestigkeiten ($d/h = 100/200 \text{ mm}$) festzustellen. Insgesamt sind die Standardabweichungen geringer als bei der feinkörnigen Mischung M2Q bzw. M3Q. Dies ist wahrscheinlich auf den geringeren Luftporengehalt zurückzuführen.

Die mittlere Festbetonrohddichte beträgt $\rho_{m,B5Q,mSF,oWB} = 2,5632 \text{ kg/dm}^3$ bei einer Standardabweichung von $s_x = 0,0215 \text{ kg/dm}^3$ ($v_x = 0,84\%$).

Tabelle 5.6: Druckfestigkeiten und Standardabweichungen für die Serie B5Q mSF oWB (in MPa)

	f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}	f_{cm}	s_x	v_x (in %)
$f_{c,cu100,7d}$	137,7	136,5	134,7	136,3	1,5	1,1
$f_{c,cu150,7d}$	140,4	133,0	137,2	136,9	3,7	2,7
$f_{c,cyl100,7d}$	110,6	111,2	118,4	113,4	4,4	3,8
$f_{c,cyl150,7d}$	120,3	114,8	120,2	118,4	3,1	2,7
$f_{c,cu100,28d}$	188,1	188,4	194,5	190,3	3,6	1,9
$f_{c,cu150,28d}$	182,0	191,9	184,7	186,2	5,1	2,8
$f_{c,cyl100,28d}$	166,5	165,6	165,5	165,9	0,6	0,4
$f_{c,cyl150,28d}$	179,4	172,1	178,8	176,8	4,1	2,3
$f_{c,cu100,90d}$	200,1	201,7	208,9	203,6	4,7	2,3
$f_{c,cu150,90d}$	196,5	197,2	200,9	198,2	2,4	1,2
$f_{c,cyl100,90d}$	186,9	189,4	188,3	188,2	1,3	0,7
$f_{c,cyl150,90d}$	173,7	180,9	175,7	176,8	3,7	2,1

Aus den Mittelwerten dieser Druckfestigkeiten wurden für die 28-Tage-Festigkeit die Umrechnungsbeiwerte ermittelt. Die Tabelle 5.7 zeigt die Umrechnungsbeiwerte für die Rezeptur B5Q mit Stahlfasern und ohne Wärmebehandlung nach 28 Tagen. Es ist festzustellen, dass die Zylinderdruckfestigkeit ($d/h = 100/200 \text{ mm}$) geringer ist als die Druckfestigkeit von größeren Zylindern. Dies ist wahrscheinlich auf die größere Streuung der Zylinderdruckfestigkeiten ($d/h = 150/300 \text{ mm}$) zurückzuführen.

Tabelle 5.7: Umrechnungsbeiwerte für B5Q mSF oWB

$f_{cm,cu100}$		= 1,0176	$f_{cm,cu150}$	= 1,1416	$f_{cm,cyl100}$	= 1,0776	$f_{cm,cyl150}$
$f_{cm,cu150}$	= 0,9827	$f_{cm,cu100}$		= 1,1218	$f_{cm,cyl100}$	= 1,0589	$f_{cm,cyl150}$
$f_{cm,cyl100}$	= 0,8760	$f_{cm,cu100}$	= 0,8914	$f_{cm,cu150}$		= 0,9439	$f_{cm,cyl150}$
$f_{cm,cyl150}$	= 0,9280	$f_{cm,cu100}$	= 0,9444	$f_{cm,cu150}$	= 1,0594	$f_{cm,cyl100}$	

5.1.2.5 Umrechnungsbeiwerte für B5Q mSF mWB

Für die Auswertung der Umrechnungsbeiwerte der grobkörnigen Mischung mit Wärmebehandlung standen pro Prüfkörpertyp und Alter drei Druckfestigkeiten zur Verfügung.

Die Druckfestigkeiten und die dazugehörigen Standardabweichungen sind in der Tabelle 5.8 dargestellt. Die höchsten Standardabweichungen werden bei den Druckfestigkeiten nach sieben Tagen erreicht. Die geringste Standardabweichung erreichen die Würfeldruckfestigkeiten ($a = 100 \text{ mm}$) nach 90 Tagen.

Die mittlere Festbetonrohddichte beträgt $\rho_{m,B5Q,mSF,mWB} = 2,5545 \text{ kg/dm}^3$ bei einer Standardabweichung von $s_x = 0,0174 \text{ kg/dm}^3$ ($v_x = 0,68\%$).

Tabelle 5.8: Druckfestigkeiten und Standardabweichungen für die Serie B5Q mSF mWB (in MPa)

	f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}	f_{cm}	s_x	v_x (in %)
$f_{c,cu100,7d}$	220,1	201,7	213,7	211,9	9,3	4,4
$f_{c,cu150,7d}$	226,6	222,2	227,9	225,6	3,0	1,3
$f_{c,cyl100,7d}$	187,2	206,0	188,1	193,8	10,6	5,5
$f_{c,cyl150,7d}$	204,4	196,2	190,5	197,0	7,0	3,6
$f_{c,cu100,28d}$	226,1	215,2	220,9	220,7	5,5	2,5
$f_{c,cu150,28d}$	225,0	217,2	225,7	222,6	4,7	2,1
$f_{c,cyl100,28d}$	205,9	200,8	191,7	199,5	7,2	3,6
$f_{c,cyl150,28d}$	208,8	207,9	201,0	205,9	4,3	2,1
$f_{c,cu100,90d}$	214,7	217,9	216,5	216,4	1,6	0,7
$f_{c,cu150,90d}$	221,1	221,3	214,6	219,0	3,8	1,7
$f_{c,cyl100,90d}$	205,2	212,6	212,0	209,9	4,1	2,0
$f_{c,cyl150,90d}$	210,3	201,0	203,8	205,0	4,8	2,3

Aus den Mittelwerten dieser Druckfestigkeiten wurden für die 28-Tage-Festigkeit die Umrechnungsbeiwerte ermittelt. Die Tabelle 5.9 zeigt die Umrechnungsbeiwerte für die Rezeptur B5Q mit Stahlfasern und mit Wärmebehandlung nach 28 Tagen. Die Umrechnungsbeiwerte für die Versuchsserie mit Wärmebehandlung zeigen, dass die erhöhte Druckfestigkeit bei größeren Prüfkörpern unabhängig von der Wärmebehandlung ist.

Die erhöhte Druckfestigkeit bei größeren Prüfkörpern ist in dieser Versuchsserie sowohl bei den Zylindern als auch bei den Würfeln zu beobachten.

Tabelle 5.9: Umrechnungsbeiwerte für B5Q mSF mWB

$f_{cm,cu100}$		= 0,9905	$f_{cm,cu150}$	= 1,0947	$f_{cm,cyl100}$	= 1,0634	$f_{cm,cyl150}$
$f_{cm,cu150}$	= 1,0096	$f_{cm,cu100}$		= 1,1052	$f_{cm,cyl100}$	= 1,0736	$f_{cm,cyl150}$
$f_{cm,cyl100}$	= 0,9135	$f_{cm,cu100}$	= 0,9048	$f_{cm,cu150}$		= 0,9714	$f_{cm,cyl150}$
$f_{cm,cyl150}$	= 0,9403	$f_{cm,cu100}$	= 0,9314	$f_{cm,cu150}$	= 1,0294	$f_{cm,cyl100}$	

5.1.3 Umrechnungsbeiwerte für die knochenförmigen UHPC-Körper

Es wurden zu Beginn des Forschungsvorhabens mehrere knochenförmige UHPC-Körper und Zylinder auf ihre Druckfestigkeit untersucht, um festzustellen welcher Formfaktor für die Umrechnung benötigt wird. Festgestellt wurde, dass die Druckfestigkeit der großen knochenförmigen UHPC-Körper ungefähr der Druckfestigkeit eines Zylinders $d/h = 150/300 \text{ mm}$ entspricht. Die Druckfestigkeit der Prüfkörper wurde während der beiden Förderperioden vor jeder Lastkombination aus Betoniergründen an drei Zylindern $d/h = 100/200 \text{ mm}$ ermittelt und anschließend mit den Umrechnungsfaktoren aus den oben genannten Tabellen auf die einaxiale Druckfestigkeit eines Zylinders $d/h = 150/300 \text{ mm}$ umgerechnet.

5.2 E-Modul des ultrahochfesten Betons

Die Bestimmung des E-Moduls des UHPC war nicht Bestandteil des Forschungsvorhabens und wurde nur bei einigen wenigen Prüfkörpern begleitend bestimmt. Die Ergebnisse der E-Modulbestimmung sind in der Tabelle 5.10 dargestellt. Zusätzlich sind die Druckfestigkeiten der Prüfkörper aufgeführt. Die Bestimmung der E-Moduln erfolgte in der Regel an Zylindern $d/h = 150/300$ mm. Bei einigen Versuchen wurden jedoch Zylinder $d/h = 100/200$ mm verwendet. Die Prüfkörperform ist zusätzlich in der Tabelle 5.10 aufgelistet. Es wurden während der ersten Förderperiode lediglich für die Mischung M2Q mit Stahlfasern und mit Wärmebehandlung eine Bestimmung des E-Moduls durchgeführt. Die Standardabweichung und der Variationskoeffizient sind für die Festigkeit und die E-Moduln zusätzlich aufgeführt.

In (DIN 1045-1:2008-08-00) ist eine Gleichung für alle Betonfestigkeitsklassen aufgeführt, mit Hilfe derer der Elastizitätsmodul des Betons als Tangente im Ursprung der Spannungs-Dehnungslinie nach 28 Tagen in Abhängigkeit der Zylinderdruckfestigkeit berechnet werden kann (Gleichung (5.1)).

$$E_{c0m,DIN} = 9500 \cdot (f_{ck} + 8)^{1/3} = 9500 \cdot (f_{cm})^{1/3} \quad [\text{MPa}] \quad (5.1)$$

Bei Anwendung der Gleichung (5.1) auf die Druckfestigkeiten des UHPC ist in der Tabelle 5.10 ($E_{c0m,DIN}$) zu erkennen, dass die Gleichung nach (DIN 1045-1:2008-08-00) den Elastizitätsmodul des UHPC zu hoch einstuft. Die Gleichung müsste dementsprechend korrigiert werden.

In (DIN EN 1992-1-1:2005-10-00) ist ebenfalls eine Gleichung für den Elastizitätsmodul (Sekantenwert zwischen $\sigma_c = 0$ und $0,4 \cdot f_{cm}$) in Abhängigkeit der mittleren Zylinderdruckfestigkeit angegeben (Gleichung (5.2)). Die Anwendung der Gleichung (5.2) auf die Druckfestigkeit des UHPC ($E_{cm,EC2}$) zeigt eine niedrigere Einstufung des Elastizitätsmoduls als nach (DIN 1045-1:2008-08-00).

$$E_{cm,EC2} = 22000 \cdot (f_{cm}/10)^{0,3} \quad [\text{MPa}] \quad (5.2)$$

Ein weiterer Vorschlag für die Bestimmung des E-Moduls ist in (fib 2010) zu finden. Sie ähnelt der Gleichung aus (DIN EN 1992-1-1:2005-10-00), lediglich der Grundwert des E-Moduls wurde etwas verringert und ein Beiwert zur Berücksichtigung des Zuschlagkorns wurde ergänzt (Gleichung (5.3)). Die Anwendung der Gleichung (5.3) auf die Druckfestigkeit des UHPC ($E_{ci,CEB}$) ist ebenfalls in der Tabelle 5.10 dargestellt. Die E-Moduln nach (fib 2010) sind höher als nach (DIN 1045-1:2008-08-00) und (DIN EN 1992-1-1:2005-10-00).

$$E_{ci,CEB} = E_{c0} \cdot \alpha_E \cdot (f_{cm}/10)^{1/3} = 21500 \cdot 1,0 \cdot (f_{cm}/10)^{1/3} \quad [\text{MPa}] \quad (5.3)$$

mit:

α_E Beiwert zur Berücksichtigung des Zuschlagkorns

Mit Hilfe der E-Modul-Versuche, welche zum großen Teil an Zylindern $d/h = 150/300$ mm durchgeführt wurden, werden für die feinkörnige und die grobkörnige Mischungen die folgenden Gleichungen (5.4) und (5.5), mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate, vorgeschlagen. Die Gleichungen wurden in Anlehnung an die Gleichung (5.2) aus (DIN EN 1992-1-1:2005-10-00) hergeleitet. Die Gleichungen gelten für UHPC mit Stahlfasern und mit oder

ohne Wärmebehandlung in Abhängigkeit der mittleren Zylinderdruckfestigkeit ($d/h = 150/300$ mm).

Die Anwendung der beiden Vorschläge für M3Q und B5Q ist zusätzlich in der Tabelle 5.10 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine bessere Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen vorhanden ist. Bei der Mischung B5Q wurden dabei die Umrechnungsfaktoren für die kleineren Zylinder $d/h = 100/200$ mm berücksichtigt. Für die Feinkornmischung M2Q existieren keine Umrechnungsfaktoren, weshalb die Rechenwerte für die E-Moduln für diese Serie ausgeschlossen werden.

M3Q:

$$E_{c0m,neu,M3Q} = 20450 \cdot (f_{cm}/10)^{0,3} \quad [\text{MPa}] \quad (5.4)$$

B5Q:

$$E_{c0m,neu,B5Q} = 21700 \cdot (f_{cm}/10)^{0,3} \quad [\text{MPa}] \quad (5.5)$$

Tabelle 5.10: Ergebnisse der E-Modulbestimmung während der ersten und der zweiten Förderperiode für die Serien M2Q, M3Q und B5Q

				f_{cm}	$E_{c0m,tat}$	s_x	v_x	$E_{c0m,DIN}$	$E_{cm,EC2}$	$E_{ci,CEB}$	$E_{c0m,neu}$
				[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
M2Q	mSF	mWB	cyl100/200	195,7	51594	843	1,63	(55155)	(53691)	(57939)	(49908)
M3Q	mSF	oWB	cyl150/300	139,8	45719	646	1,41	49305	48537	51793	45118
M3Q	mSF	mWB	cyl150/300	173,7	48221	550	1,14	53006	51804	55681	48154
B5Q	mSF	oWB	cyl100/200	168,6	52550	584	1,11	52482	51343	55130	50643
B5Q	mSF	oWB	cyl150/300	169,3	50338	824	1,64	52554	51407	55207	50706
B5Q	mSF	mWB	cyl100/200	208,5	50846	849	1,67	56332	54721	59175	53975
B5Q	mSF	mWB	cyl150/300	204,4	53694	558	1,04	55961	54396	58785	53654

Im Bild 5.2 sind die Ergebnisse der E-Modul-Versuche in Abhängigkeit der Zylinderdruckfestigkeit ($d/h = 150/300$ mm) dargestellt. Zusätzlich sind die Kurven nach den Gleichungen (5.1) bis (5.5) eingetragen. Es ist zu erkennen, dass die neuen Ansätze für den UHPC gut zu den Versuchsergebnissen passen und nicht von der Wärmebehandlung abhängen. Die geringsten Abweichungen aus der Literatur werden durch die Gleichung (5.2) aus (DIN EN 1992-1-1:2005-10-00) erzielt. Die größten Abweichungen durch die Gleichung (5.3) aus (fib 2010). Trotz der sehr ähnlichen Gleichungen ist die unterschiedliche Potenzierung der mittleren Druckfestigkeit der Grund für die höher berechneten E-Moduln.

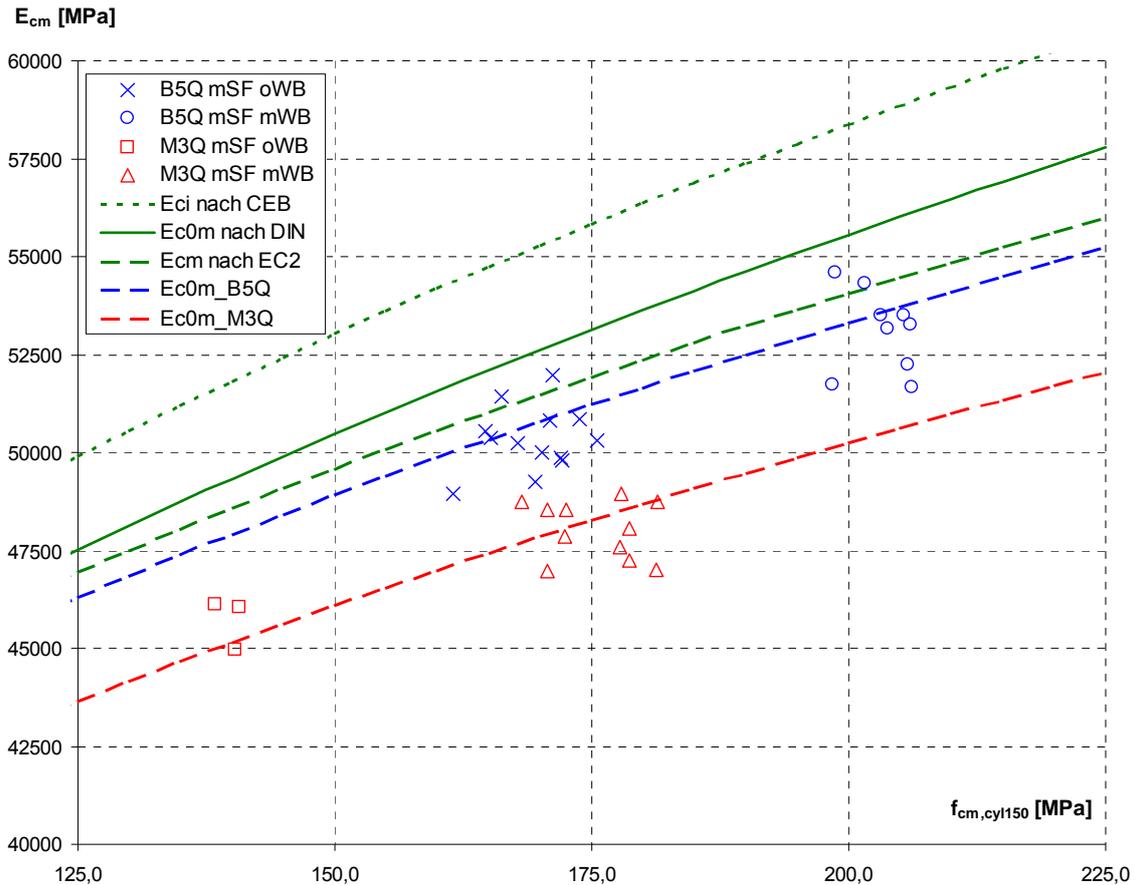


Bild 5.2: Ergebnisse der E-Modul-Versuche des UHPC (Mischung M3Q und B5Q)

5.3 Zugfestigkeit des ultrahochfesten Betons

Nach (DIN 1045-1:2008-08-00), (DIN EN 1992-1-1:2005-10-00) und (fib 2010) wird die zentrische Zugfestigkeit bei hochfesten Betonen nach Gleichung (5.6) in Abhängigkeit der mittleren Zylinderdruckfestigkeit berechnet.

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + f_{cm}/10) \quad [\text{MPa}] \quad (5.6)$$

Im Bild 5.3 sind die Ergebnisse der zentrischen Zugversuche (kleine knochenförmige UHPC-Körper) in Abhängigkeit der mittleren Zylinderdruckfestigkeiten ($d/h = 100/200$ mm) für die Serien M3Q (MHV) und B5Q (BHV) dargestellt. Zusätzlich im Bild 5.3 ist die Gleichung (5.6) dargestellt, wobei der Umrechnungsbeiwert aus Abschnitt 5.1.2 für die Serie M3Q für Zylinder $d/h = 100/200$ mm in die Gleichung eingesetzt wurde. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Ansatz der Normen die Zugfestigkeit zu gering abschätzt.

In der Anlage 12.2 sind alle Ergebnisse der statischen Versuche (Druckfestigkeiten, Zugfestigkeiten und Biegezugfestigkeiten) für alle Mischungen zusammengefasst.

Mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate werden die Gleichungen (5.7) und (5.8) als Abschätzung der zentrischen Zugfestigkeit vorgeschlagen. Die Gleichungen gelten für UHPC mit Stahlfasern und mit oder ohne Wärmebehandlung in Abhängigkeit der mittleren Zylinderdruckfestigkeit ($d/h = 150/300$ mm). Die Lage der Gleichungen sind zusätzlich im Bild 5.3 dargestellt und bilden die Versuche gut ab. Für das Bild wurden dabei die Zylinderdruckfestigkeiten umgerechnet. Die mittlere Zugfestigkeit der Zugversuche im Bild 5.3 beträgt bei der

Mischung M3Q $f_{ctm,M3Q,mSF,mWB} = 11,55 \text{ MPa}$ bei einer Standardabweichung von $s_x = 0,9673 \text{ MPa}$ ($v_x = 8,38\%$) und bei der Mischung B5Q $f_{ctm,B5Q,mSF,mWB} = 8,59 \text{ MPa}$ bei einer Standardabweichung von $s_x = 0,8414 \text{ MPa}$ ($v_x = 9,80 \%$).

M3Q:

$$f_{ctm} = 3,95 \cdot \ln(1 + f_{cm}/10) \quad [\text{MPa}] \quad (5.7)$$

B5Q:

$$f_{ctm} = 2,83 \cdot \ln(1 + f_{cm}/10) \quad [\text{MPa}] \quad (5.8)$$

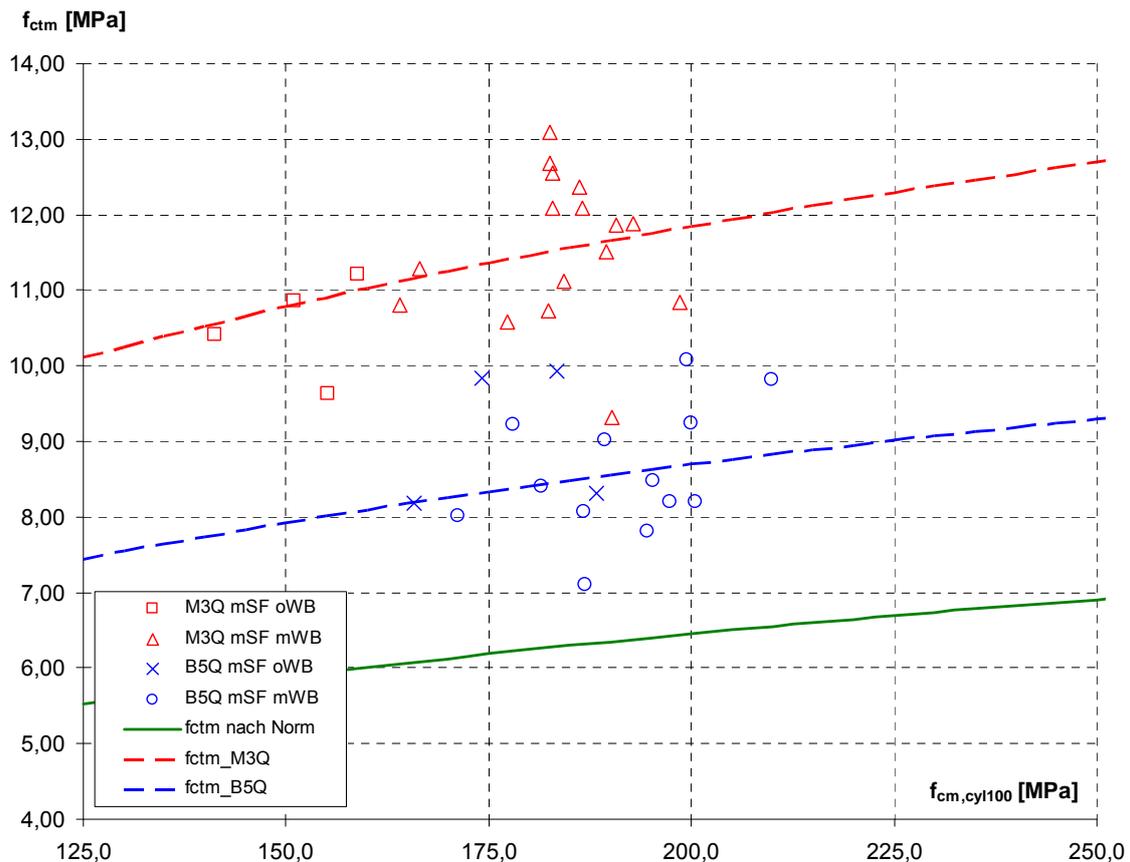


Bild 5.3: Mittlere Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des UHPC (Mischung M3Q und B5Q)

5.4 Biegezugfestigkeit des ultrahochfesten Betons

Die Biegezugfestigkeiten wurden während den beiden Förderperioden an Prismen mit den Abmessungen 40x40x160 mm bestimmt. Die Bestimmung der Biegezugfestigkeit erfolgte nach (DIN EN 196-1:2005-05-00) in einem Drei-Punkt-Biegezugversuch mit einer Stützweite von $l = 100 \text{ mm}$ (s. Bild 5.4). Die Biegezugfestigkeit errechnet sich anschließend nach Gleichung (5.9). Nach dem Biegezugversuch wurden die beiden Hälften des Probekörpers gedreht und zur Bestimmung der Druckfestigkeit verwendet (Grundfläche der Prüfplatten 40 x 40 mm).

$$f_{\text{ctm},\text{fl}} = 1,5 \cdot \frac{N_u \cdot l}{b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}] \quad (5.9)$$

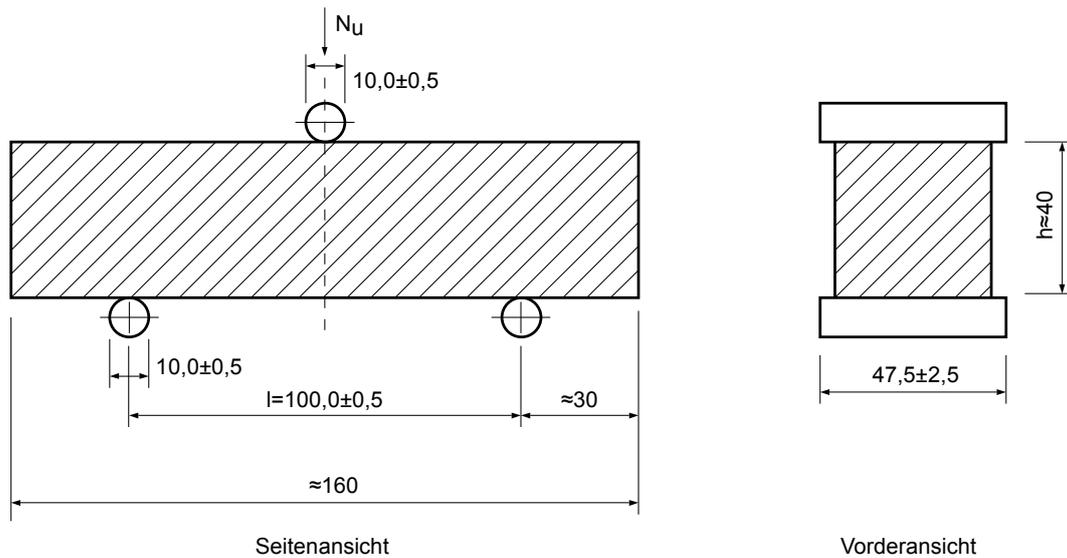


Bild 5.4: Belastungsanordnung zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Maße in mm) (aus DIN EN 196-1:2005-05-00)

Für die Auswertung werden die unterschiedlichen Betonsorten und die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen gesondert betrachtet. Im Bild 5.5 sind die Biegezugfestigkeiten in Abhängigkeit der Zylinderdruckfestigkeiten ($d/h = 100/200$ mm) für die Serien M2Q (WB und HV), M3Q (MHV) und B5Q (BHV) dargestellt. Zusätzlich ist die Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit der Druckfestigkeit nach (DIN EN 1992-1-1:2005-10-00) als durchgezogene Linie dargestellt. Sie errechnet sich nach Gleichung (5.10) mit der Prüfkörperhöhe $h = 40$ mm und in Abhängigkeit der zentrischen Zugfestigkeit. Für die zentrische Zugfestigkeit wird im ersten Schritt die Gleichung (5.6) aus den Normen in die folgenden Gleichungen eingesetzt. Des Weiteren wurden für das Bild 5.5 die Umrechnungsbeiwerte aus Abschnitt 5.1.2 für die Serie M3Q und B5Q für Zylinder $d/h = 100/200$ mm in die folgenden Gleichungen eingesetzt.

$$f_{\text{ctm},\text{fl}} = \left(1,6 - \frac{h}{1000}\right) \cdot f_{\text{ctm}} \geq f_{\text{ctm}} \quad [\text{MPa}] \quad (5.10)$$

Nach (fib 2010) errechnet sich die mittlere Biegezugfestigkeit zu:

$$f_{\text{ctm},\text{fl}} = \frac{1 + \alpha_{\text{fl}} \cdot h^{0,7}}{\alpha_{\text{fl}} \cdot h^{0,7}} \cdot f_{\text{ctm}} = \frac{1 + 0,06 \cdot h^{0,7}}{0,06 \cdot h^{0,7}} \cdot f_{\text{ctm}} \quad [\text{MPa}] \quad (5.11)$$

Der Beiwert $\alpha_{\text{fl}} = 0,06$ ist für den Normalbeton hergeleitet worden. Es wird in (fib 2010) ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dieser Beiwert von der Sprödigkeit bzw. Duktilität abhängt. Je spröder der Beton wird, desto kleiner wird der Beiwert. Dies bedeutet, dass beim spröderen ultrahochfesten Beton der Beiwert α_{fl} reduziert werden muss. Die rechnerische Biegezugfestigkeit nach (fib 2010) ist für $\alpha_{\text{fl}} = 0,06$ zusätzlich im Bild 5.5 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass beide Ansätze nach Norm und fib einen zu geringen Wert für die Biegezugfestigkeit liefern.

Mit Hilfe der Biegezugversuche wurde der Beiwert α_{fl} neu festgelegt. Es werden für die feinkörnige und die grobkörnige Mischungen die folgenden Gleichungen (5.12) und (5.13) vorgeschlagen. Die Gleichungen gelten für UHPC mit Stahlfasern und mit oder ohne Wärmebehandlung. Dabei wurden für die zentrischen Zugfestigkeiten, die neuen Beiwerte bzw. die Gleichungen (5.7) und (5.8) verwendet. Die beiden neuen Ansätze sind zusätzlich im Bild 5.5 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die beiden neuen Ansätze gut mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen.

M3Q:

$$f_{ctm,fl} = \frac{1 + \alpha_{fl} \cdot h^{0,7}}{\alpha_{fl} \cdot h^{0,7}} \cdot f_{ctm} = \frac{1 + 0,027 \cdot h^{0,7}}{0,027 \cdot h^{0,7}} \cdot 3,95 \cdot \ln(1 + f_{cm}/10) \quad [\text{MPa}] \quad (5.12)$$

B5Q:

$$f_{ctm,fl} = \frac{1 + \alpha_{fl} \cdot h^{0,7}}{\alpha_{fl} \cdot h^{0,7}} \cdot f_{ctm} = \frac{1 + 0,023 \cdot h^{0,7}}{0,023 \cdot h^{0,7}} \cdot 2,83 \cdot \ln(1 + f_{cm}/10) \quad [\text{MPa}] \quad (5.13)$$

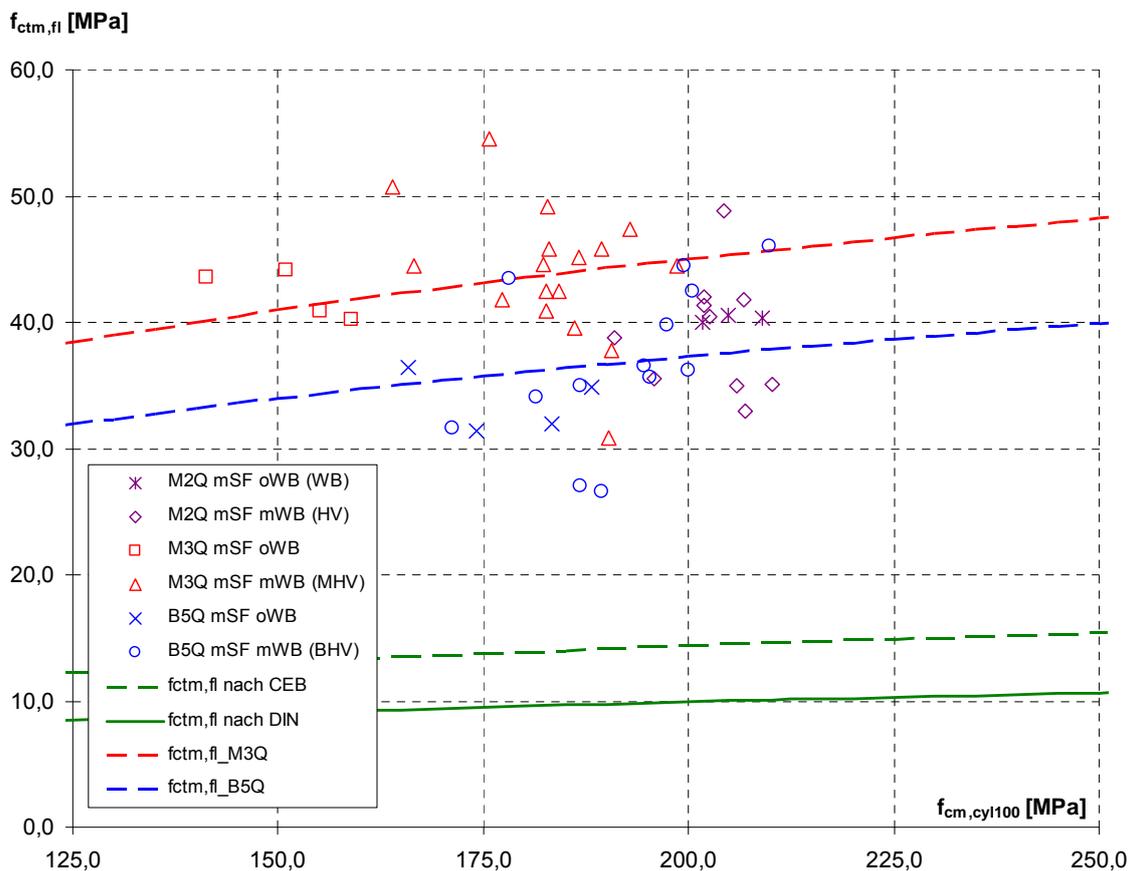


Bild 5.5: Mittlere Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des UHPC (Mischung M2Q, M3Q und B5Q)

Zur besseren Übersicht ist in der Tabelle 5.11 eine Zusammenstellung der Zylinderdruckfestigkeiten und der zugehörigen Biegezugfestigkeiten für die unterschiedlichen Mischungen und die verschiedenen Lagerungsbedingungen aufgeführt. Die Zylinderdruckfestigkeiten wurden an Zylinder $d/h = 100/200$ mm und die Biegezugfestigkeiten an kleinen Prismen

40x40x160 mm bestimmt. Wie zu erwarten war, ist keine Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit von der Lagerungsart zu erkennen. Der Einfluss der Stahlfasern auf die Biegezugfestigkeit ist dagegen deutlich sichtbar.

Zusätzlich sind in der Tabelle 5.11 die Standardabweichungen und Variationskoeffizienten angegeben. Die größten Streuungen sind bei der Biegezugfestigkeit der grobkörnigen UHPC-Mischung B5Q (mSF mWB) festzustellen. Des Weiteren sind in der Tabelle die Prismendruckfestigkeiten (40x40 mm) aufgeführt.

In der Anlage 12.2 sind alle Ergebnisse der statischen Versuche (Druckfestigkeiten, Zugfestigkeiten und Biegezugfestigkeiten) für alle Mischungen zusammengefasst.

Die rechnerische Biegezugfestigkeit mit den neuen Ansätzen aus Gleichung (5.12) und (5.13) ergeben eine kalkulierte Biegezugfestigkeit $f_{ctm,fl,cal}$, welche von der Zylinderdruckfestigkeit abhängt und ist in der Tabelle 5.11 zum Vergleich mit aufgeführt. Die kalkulierten Biegezugfestigkeiten weichen nur sehr gering von den im Versuch ermittelten Biegezugfestigkeiten ab.

Tabelle 5.11: Ergebnisse der Biegezugfestigkeiten während der ersten und der zweiten Förderperiode

			cyl100/200			pr40/40			pr40/40/160			
			$f_{cm,cyl100}$	s_x	v_x	$f_{cm,pr40}$	s_x	v_x	$f_{ctm,fl}$	s_x	v_x	$f_{ctm,fl,cal}$
			[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]
M2Q	oSF	mWB	203,9	5,9	2,91	198,7	9,0	4,54	20,78	1,67	8,05	-
M2Q	mSF	oWB	203,6	10,6	5,20	247,8	6,8	2,73	40,31	2,61	6,47	-
M2Q	mSF	mWB	207,0	10,9	5,25	250,9	11,0	4,38	39,02	5,25	13,44	-
M3Q	mSF	oWB	151,6	9,3	6,12	208,4	18,1	8,70	42,23	3,43	8,12	41,12
M3Q	mSF	mWB	182,9	9,6	5,24	233,2	11,4	4,89	43,99	6,66	15,15	43,77
B5Q	mSF	oWB	177,9	9,4	5,28	228,4	14,5	6,36	33,70	2,49	7,40	35,92
B5Q	mSF	mWB	191,8	10,7	5,58	246,3	19,6	7,95	36,84	7,25	19,68	36,79

Im Rahmen eines Ringversuches während der zweiten Förderperiode wurden die Biegezugfestigkeiten an großen Balken 150x150x700 mm nach (DAfStb 2009) an einem Vier-Punkt-Biegezugversuch mit einer Stützweite von $l = 600$ mm bestimmt (s. Bild 5.6). Dabei wurden die beiden Standardmischungen M3Q und B5Q ohne Wärmebehandlung und mit Stahlfasern verwendet. Es wurden zusätzlich zu den Balken die Druckfestigkeiten an Zylindern $d/h = 150/300$ mm und die Biegezugfestigkeiten an kleinen Prismen 40x40x160 mm ermittelt.

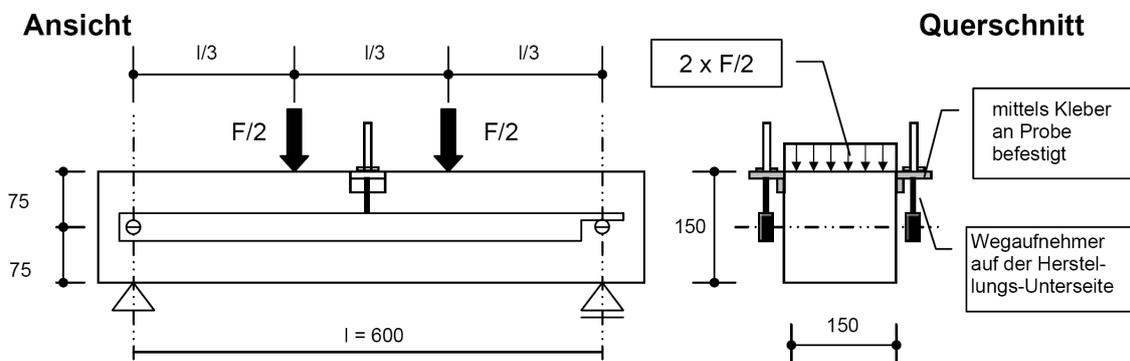


Bild 5.6: Belastungsanordnung zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Maße in mm) (aus DAfStb 2009)

Eine Übersicht der Ergebnisse ist in der Tabelle 5.12 dargestellt. Die Biegezugfestigkeiten der Balken betragen ca. 50-60% der Biegezugfestigkeit der kleinen Prismen. Die Streuungen der Biegezugfestigkeiten der großen Balken sind deutlich höher als der kleinen Prismen. Zur Überprüfung der hergeleiteten Gleichungen (5.12) und (5.13), wurden diese zusätzlich in der Tabelle 5.12 aufgeführt. Die kalkulierten Biegezugfestigkeiten $f_{ctm,fl,cal,150}$ und $f_{ctm,fl,cal,40}$ stimmen sehr gut mit den in den Versuchen ermittelten Werten überein.

Tabelle 5.12: Ergebnisse der Biegezugfestigkeiten während des Ringversuches

			cyl 150/300			blk 150/150/700				pr 40/40/160			
			f_{cm}	s_x	v_x	$f_{ctm,fl}$	s_x	v_x	$f_{ctm,fl,cal,150}$	$f_{ctm,fl}$	s_x	v_x	$f_{ctm,fl,cal,40}$
			[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]
M3Q	mSF	oWB	133,9	4,5	3,33	20,60	3,65	17,74	22,23	39,12	3,78	9,65	40,03
B5Q	mSF	oWB	148,9	7,9	5,31	18,54	2,33	12,57	18,03	31,64	3,63	11,46	33,56

Im Bild 5.7 ist die Last-Durchbiegungs-Beziehung zur Ermittlung der Nachrissbiegezugfestigkeit aus (DAfStb 2009) dargestellt. Nach dem linearen Anstieg bis zur Maximallast werden auf dem abfallenden Ast an der Durchbiegungsstelle 0,5 mm und 3,5 mm die zugehörigen Lasten gemessen. Mit Hilfe dieser Lasten wird bei einem Stahlfaserbetonbalken die Nachrissbiegezugfestigkeit bestimmt.

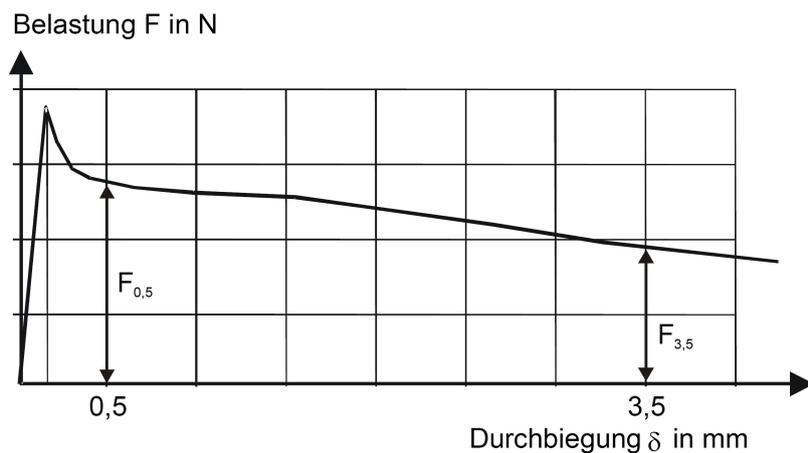


Bild 5.7: Last-Durchbiegungs-Beziehung zur Ermittlung der Nachrissbiegezugfestigkeiten (aus DAfStb 2009)

Zum Vergleich ist im Bild 5.8 die Last-Durchbiegungs-Beziehung der Biegezugversuche der Serie M3Q dargestellt. Eine Ermittlung der Nachrissbiegezugfestigkeit nach (DAfStb 2009), welche für Druckfestigkeitsklassen bis C50/60 bestimmt ist, ist für den UHPC nicht eindeutig möglich. Bei den Versuchen ist ebenfalls ein linearer Anstieg bis ca. 0,2 mm Durchbiegung zu erkennen. Im Gegensatz zum normalen Stahlfaserbeton ist jedoch nach der Rissbildung eine deutliche Steigerung der Last zu erkennen. Anschließend erfolgt ein stetiger Abfall der Last bis zum Bruch. Die maximale Last wird bei ca. 0,5 mm Durchbiegung für die Mischung B5Q und bei ca. 1,0 mm Durchbiegung für die Mischung M3Q erreicht. Im Bild 5.9 ist die Last-Durchbiegungs-Beziehung der Biegezugversuche der Serie B5Q dargestellt.

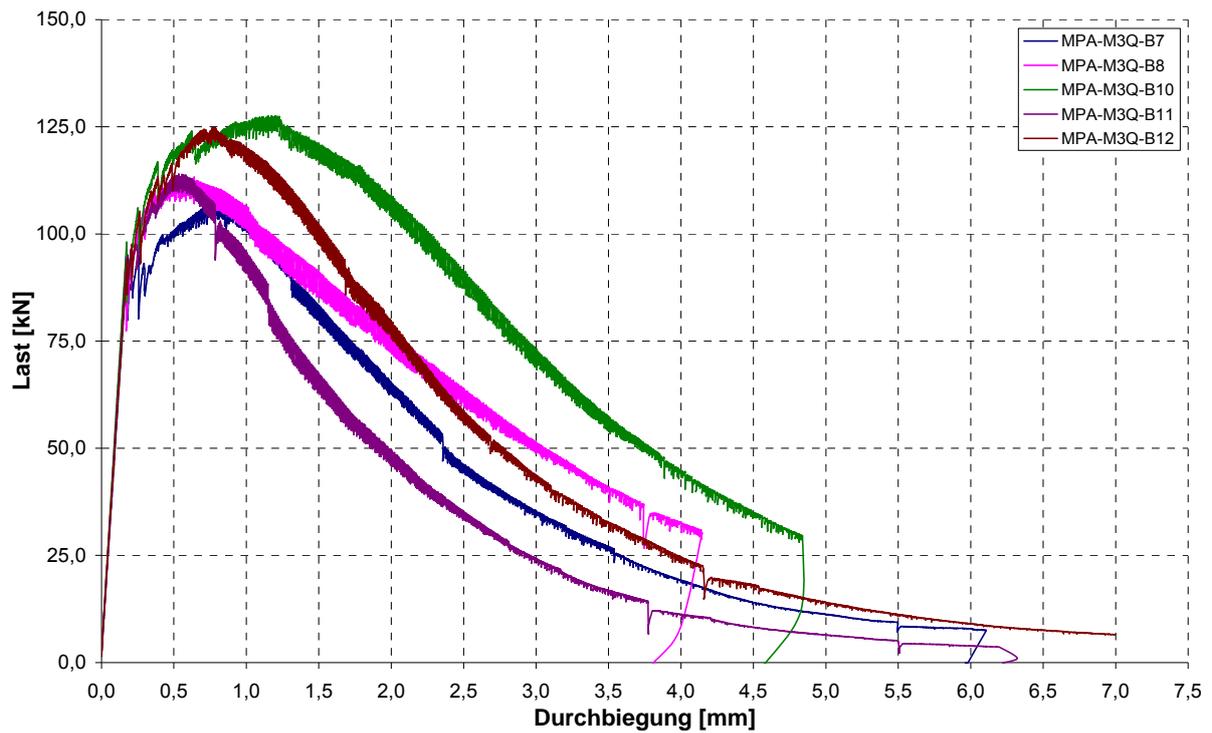


Bild 5.8: Last-Durchbiegungs-Beziehung des UHPC (Mischung M3Q mSF oWB)

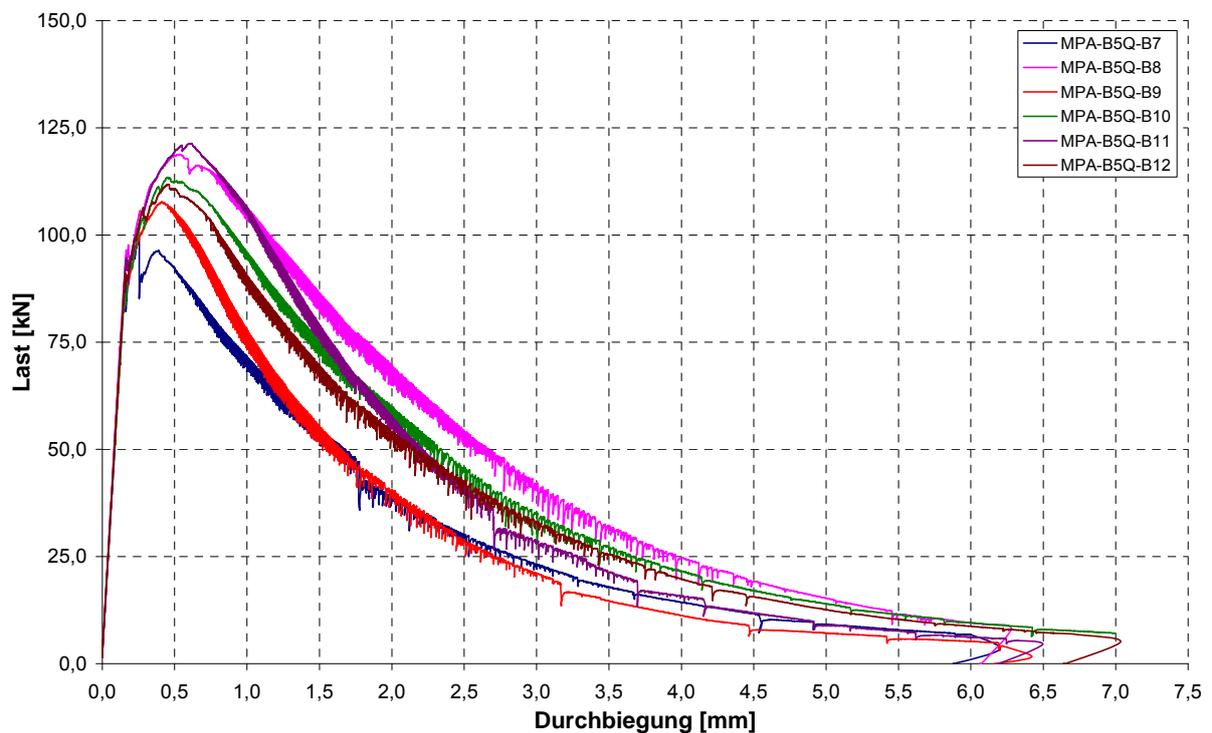


Bild 5.9: Last-Durchbiegungs-Beziehung des UHPC (Mischung B5Q mSF oWB)

5.5 Umrechnung der Zugfestigkeit für die knochenförmige UHPC-Körper

Die Umrechnung der zentrischen Zugfestigkeit für die knochenförmigen UHPC-Körper erforderte einige Vorversuche. Durch die Ermittlung der Biegezugfestigkeit an kleinen Prismen

mit den Abmessungen 40x40x160 mm und der Gleichung (5.14) aus (AFGC 2002) konnte eine erste Umrechnung der Biegezugfestigkeit in die zentrische Zugfestigkeit erfolgen.

$$f_{ctm,cal} = \frac{2 \cdot (h/100)^{0,7}}{1 + 2 \cdot (h/100)^{0,7}} \cdot f_{ctm,fl} \quad [\text{MPa}] \quad (5.14)$$

Durch zentrische Zugversuche an gekerbten und ungekerbten knochenförmigen UHPC-Körpern konnte festgestellt werden, dass die Umrechnung mit der Gleichung (5.14) nicht ausreichend genau ist und zu hohe Werte für die zentrische Zugfestigkeit liefert. Die zentrischen Zugversuche erfolgten mit einer speziellen Versuchseinrichtung, die im Bild 5.10 für die UHPC-Körper dargestellt ist.

Da nur eine begrenzte Anzahl von Prüfkörpern zur Verfügung stand, wurden zusätzlich kleine knochenförmige UHPC-Körper hergestellt. Mit Hilfe der Zugfestigkeiten der kleinen Knochen und der ermittelten Biegezugfestigkeit wurde anschließend die zentrische Zugfestigkeit der großen knochenförmigen UHPC-Körper ermittelt. Die Prüfkörperabmessungen und die Versuchseinrichtung der kleinen Knochen sind im Bild 5.11 dargestellt. Die Ober- und Unterseite der kleinen knochenförmigen UHPC-Körper wurden mit Hilfe des Zwei-Komponenten-Epoxidharzklebstoffes MC-DUR 1280 (MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG, Bottrop, Deutschland) an die Lasteintragungsplatten verklebt. Nach einer eintägigen Erhärtungszeit wurden die kleinen knochenförmigen UHPC-Körper zentrisch geprüft.



Bild 5.10: Versuchseinrichtung für den zentrischen Zugversuch an UHPC-Körpern

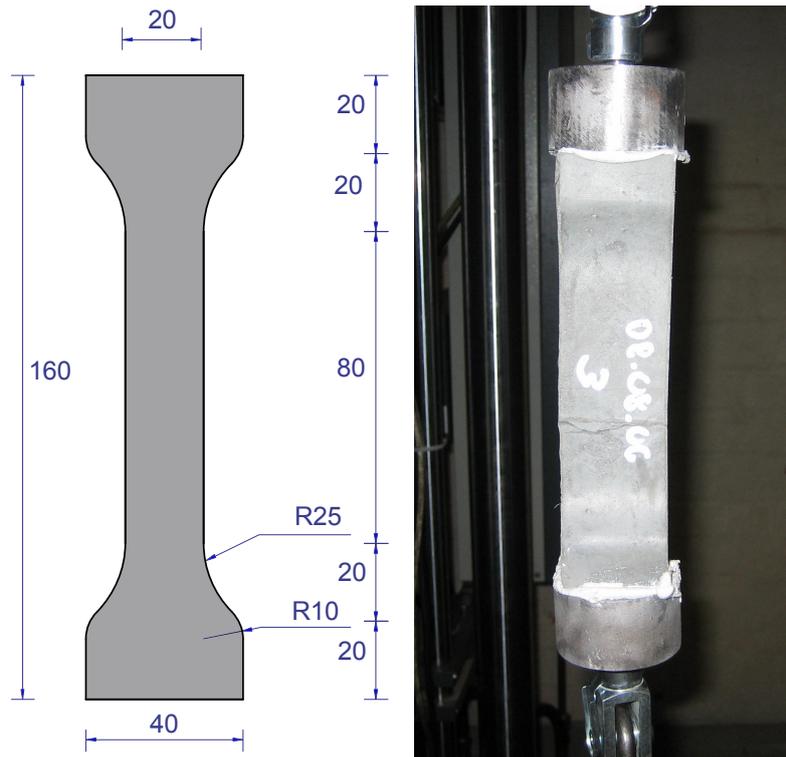


Bild 5.11: Prüfkörperabmessungen und Versuchseinrichtung der kleinen knochenförmigen UHPC-Körper (Maße in mm)

Eine Übersicht der zentrischen Zugfestigkeiten während der ersten und der zweiten Förderperiode für die großen und die kleinen UHPC-Körper ist in der Tabelle 5.13 dargestellt. Zusätzlich sind in der Tabelle 5.13 die zugehörigen Biegezugfestigkeiten aufgeführt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Höhe der großen knochenförmigen UHPC-Körper während der ersten Förderperiode 250 mm (M2Q) und während der zweiten Förderperiode 450 mm (M3Q und B5Q) betrug. Die kalkulierte zentrische Zugfestigkeit ($f_{ctm,cal}$) errechnet sich mit Hilfe der Biegezugfestigkeit und der Gleichung (5.14). Für die Ermüdungsversuche der zweiten Förderperiode kam nur UHPC mit Wärmebehandlung zum Einsatz, deshalb fehlen in der Tabelle 5.13 die Werte für die zentrische Zugfestigkeit der großen knochenförmigen UHPC-Körper ($f_{ctm,gr}$).

Tabelle 5.13: Ergebnisse der zentrischen Zugfestigkeiten während der ersten und der zweiten Förderperiode

			h = 250 bzw. 450 mm			h = 160 mm			pr 40/40/160			
			$f_{ctm,gr}$	s_x	v_x	$f_{ctm,kl}$	s_x	v_x	$f_{ctm,fl}$	s_x	v_x	$f_{ctm,cal}$
			[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]
M2Q	oSF	mWB	8,59	0,83	9,70	12,34	1,37	11,07	20,78	1,67	8,05	10,66
M2Q	mSF	oWB	7,82	1,59	20,33	11,76	0,60	5,11	40,31	2,61	6,47	20,68
M2Q	mSF	mWB	9,40	1,39	14,80	13,20	1,43	10,80	39,02	5,25	13,44	20,01
M3Q	mSF	oWB	-	-	-	10,53	1,16	11,04	42,23	3,43	8,12	21,66
M3Q	mSF	mWB	10,36	1,78	17,18	11,60	1,33	11,48	43,99	6,66	15,15	22,56
B5Q	mSF	oWB	-	-	-	9,36	0,95	10,17	33,70	2,49	7,40	17,29
B5Q	mSF	mWB	8,76	1,06	12,15	8,47	1,02	12,02	36,84	7,25	19,68	18,90

Mit Hilfe der Vorversuche wurde somit die Umrechnungsformel in Gleichung (5.15) ermittelt, welche die zentrische Zugfestigkeit der großen UHPC-Körper sehr gut widerspiegelt. Zur Berechnung der zentrischen Zugfestigkeit der großen Prüfkörper $f_{ctm,gr}$ muss nun lediglich die zentrische Zugfestigkeit der kleinen Prüfkörper $f_{ctm,kl}$ und die Biegezugfestigkeit $f_{ctm,fl}$ an Prismen mit den Abmessungen 40x40x160 mm ermittelt werden. Nach Umrechnung der Biegezugfestigkeit $f_{ctm,fl}$ in die kalkulierte Zugfestigkeit $f_{ctm,cal}$ mit Hilfe der Gleichung (5.14) kann die zentrische Zugfestigkeit der großen Knochen $f_{ctm,gr}$ nach Gleichung (5.15) berechnet werden. Die benötigten Formfaktoren k_1 und k_2 variieren je nachdem, welcher UHPC (mit/ohne Fasern oder mit/ohne Wärmebehandlung) verwendet wird und sind in der Tabelle 5.14 aufgeführt.

Diese Formel gilt für dieses Forschungsvorhaben und sollte erst nach Überprüfung, auf andere Betonsorten oder Prüfkörperabmessungen angewandt werden.

$$f_{ctm,gr} = 0,5 \cdot \left(k_1 \cdot \frac{f_{ctm,cal}^2}{f_{ctm,kl}} + k_2 \cdot \frac{f_{ctm,kl}^2}{f_{ctm,cal}} \right) \quad [\text{MPa}] \quad (5.15)$$

Tabelle 5.14: Formfaktoren k_1 und k_2 zur Ermittlung der zentrischen Zugfestigkeit der großen knochenförmigen UHPC-Körper

			k_1	k_2
			-	-
M2Q	oSF	mWB	0,9327	0,6014
M2Q	mSF	oWB	0,2149	1,1694
M2Q	mSF	mWB	0,3097	1,0799
M3Q	mSF	oWB	-	-
M3Q	mSF	mWB	0,2361	1,7376
B5Q	mSF	oWB	-	-
B5Q	mSF	mWB	0,2077	2,3099

Zusätzlich sind in der Anlage 12.3 für einige Zugversuche die Last-Verformungs-Kurven verschiedener UHPC Serien dargestellt. Sowohl die Serien mit als auch die Serien ohne Stahlfasern zeigen bis zum Bruch ein deutlich lineares Verhalten. Nach dem Bruch erfolgt ein plötzlicher Abfall der Last, da die kurzen Stahlfasern komplett aus dem UHPC ausgezogen werden bzw. nicht vorhanden sind. Ein duktileres Bruchverhalten kann nur durch längere Stahlfasern erzielt werden.

5.6 Umrechnung der Festigkeiten für die dynamischen Versuche

Vor Beginn jeder neuen Lastkombination wurden die zentrische Zugfestigkeit und die Druckfestigkeit der großen knochenförmigen UHPC-Körper bestimmt. Mit Hilfe der ermittelten Festigkeiten wurden die Ermüdungsversuche kraftgesteuert durchgeführt.

Für die Ermittlung der Druckfestigkeit der großen UHPC-Körper wurden die Druckfestigkeiten von drei Zylindern $d/h = 100/200$ mm bestimmt. Anschließend wurde mit Hilfe der im Abschnitt 5.1.2 genannten Umrechnungsbeiwerte die Zylinderdruckfestigkeit ($d/h = 150/300$ mm) errechnet, was der Druckfestigkeit der großen UHPC-Körper entspricht.

Die zentrische Zugfestigkeit der großen UHPC-Körper wurde mit Hilfe von drei kleinen knochenförmigen UHPC-Körpern und der Biegezugfestigkeit von drei Prismen 40x40x160 mm ermittelt. Mit Hilfe der Gleichung (5.15) wurde die zentrische Zugfestigkeit der großen UHPC-

Körper berechnet. Während des Forschungsvorhabens wurden die Formfaktoren und die Gleichung wiederholt stichprobenartig kontrolliert und bestätigt.

6 Versuchs- und Messeinrichtung

Die UHPC-Körper wurden mit Hilfe des Zwei-Komponenten-Epoxidharzklebstoffes MC-DUR 1280 (MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG, Bottrop, Deutschland) starr mit den Druckplatten der Querhaupte verbunden (Bild 6.1). Die Klebeflächen wurden vor dem Verkleben vorbehandelt, d.h. mit festem Strahlgut gestrahlt, um somit eine optimale Haftfestigkeit des Epoxidharzklebstoffes zu erreichen ((Mühlbauer, Zilch 2007), (Zilch, Mühlbauer 2007)). Exzentrizitäten wurden durch Schleifen planparalleler Aufstandsflächen, Zentrierung während des Einbaus und Verklebung der Prismen mit den zylindrischen Anschlussstücken erst in der Prüfmaschine minimiert. Für die Aushärtung der Verklebung wurde je Prüfkörper, wie auch bei den zentrischen Zugversuchen, mindestens 24 Stunden vorgesehen.

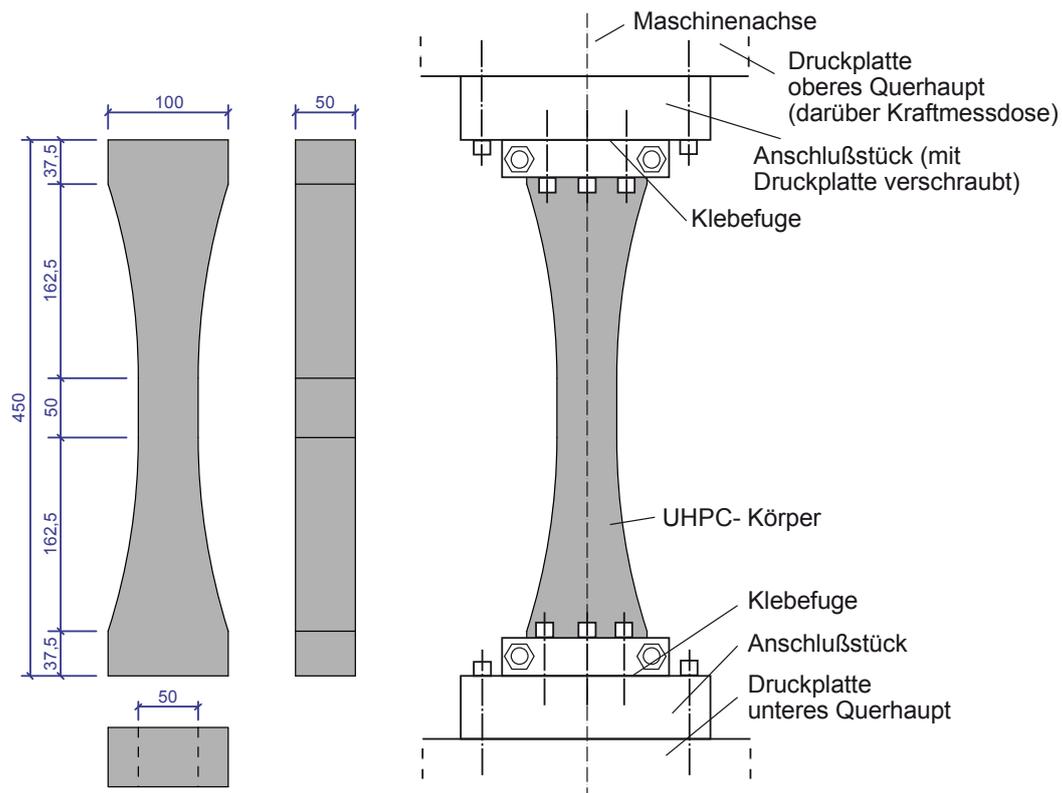


Bild 6.1: Prüfkörperabmessungen (in mm) und Einbau in Prüfmaschine (schematisch)

Für die Durchführung der Versuche wurde eine zweisäulige Schenck-Hydropuls-Universalprüfmaschine mit einem Lastbereich von ± 400 kN für dynamische Versuche verwendet, die einen äußerst steifen Aufbau aufweist. Für die Steuerung des servohydraulisch geregelten Hydropuls-Zylinders wurde ein digitaler Servo-Controller Zwick/Roell K7500 verwendet. Die in Anlehnung an vorliegende Wöhlerversuche an Normalbeton und hochfestem Beton angestrebte Prüffrequenz von 10 Hz wurde mit der gewählten apparativen Ausstattung zielsicher erreicht. Für Versuche im Zugursprungsbereich bzw. bei betragsmäßig geringen Unterspannungen im Druckbereich wurde eine Zweisäulen- Universalprüfmaschine Instron 8032 mit einem für dynamische Versuche vorgesehenen Lastbereich ± 100 kN verwendet.

Während der zweiten Förderperiode wurden die Versuche mit geringen Schwingbreiten und hohen Lastwechselzahlen an einem zweisäuligen Hochfrequenzpulsator 400 kN der Firma Zwick GmbH & Co. KG durchgeführt. Die erreichte maximale Prüffrequenz betrug dabei ca. 100 Hz.

Für Versuche mit betragsmäßig größeren Unterspannungen im Druckbereich wurde eine Viersäulen-Universalprüfmaschine der Firma RK MFL Prüfsysteme, Typ EVO 1600 (maximale Zugkraft 1600 kN, Lastbereich ± 1000 kN) und eine Viersäulen-Universalprüfmaschine der Firma Zwick GmbH & Co. KG, EVO 1000 (maximale Zugkraft 1000 kN, Lastbereich ± 1000 kN) verwendet.

Neben der Belastung wurde bei einigen Versuchen der ersten Förderperiode und bei allen Versuchen der zweiten Förderperiode die Längenänderung der Knochen auf einer Basislänge von 50 bzw. 100 mm (Bereich konstanten Querschnitts) gemessen. Mit Hilfe einer hochfrequenten Messung wurde zusätzlich zur Veränderung der Last-Verformungs-Charakteristik, die mit zunehmender Lastwechselzahl durch die auftretende Schädigung abnehmende Achsialsteifigkeit und somit der Schädigungsfortschritt erfasst. Naturgemäß enthalten die gemessenen Verformung Kriech- und Schwindanteile.

Zur Aufnahme der Verformungen wurden vier Wegaufnehmer (Messbereich ± 5 mm; Genauigkeit 0,1% des Gesamtweges) verwendet. Die Messwertaufnahme erfolgte mit digitalen Messverstärkern und einer Messrate von 100 bzw. 200 Hz. Ein Messprogramm zur Aufzeichnung, Auswertung und Speicherung der gemessenen Daten wurde während der ersten Förderperiode entwickelt, um redundante Datenhaltung zu vermeiden.

Die UHPC-Körper, an denen Verformungen gemessen wurden, sind derart ausgewählt worden, dass repräsentative Ergebnisse und gleichzeitig Aussagen zu auftretenden Streuungen möglich sind.

Bild 6.2 zeigt die UHPC-Körper mit den Wegaufnehmern. Zusätzlich wurde die Prüfkörpertemperatur während des Versuches gemessen um feststellen zu können, ob eine zusätzliche Temperaturbelastung auftritt.

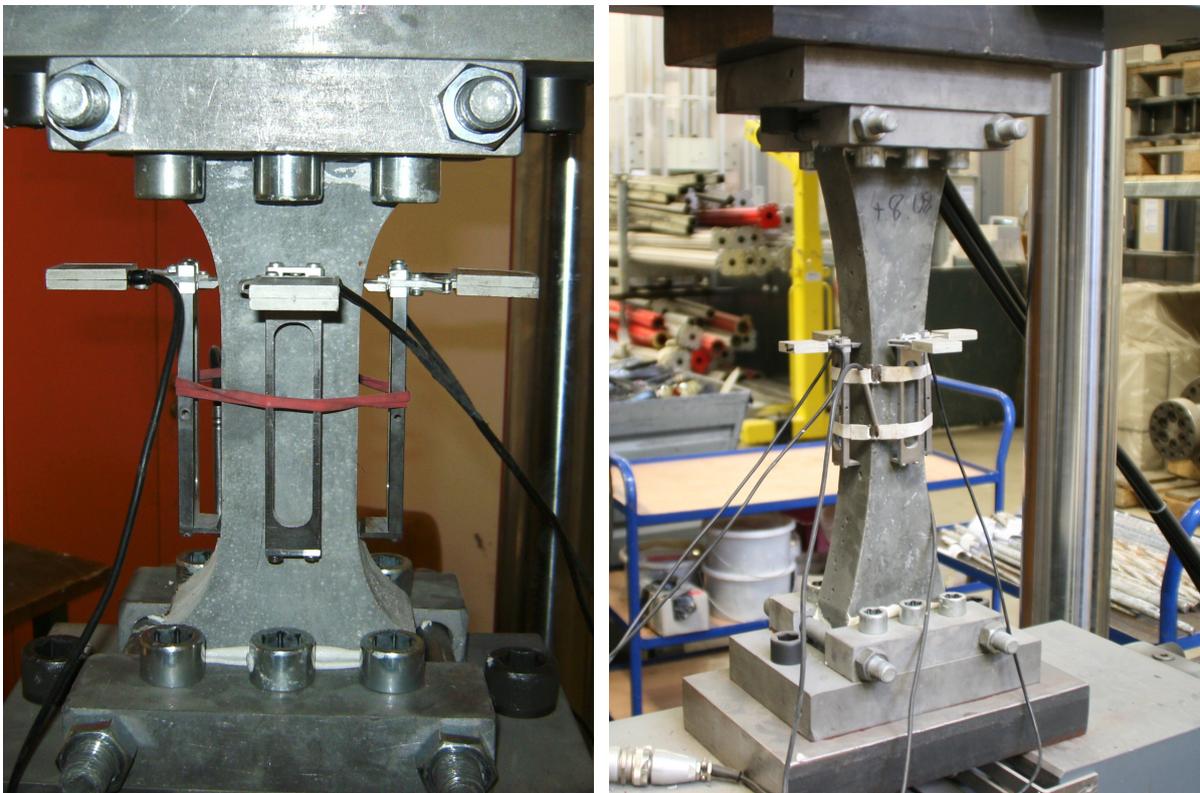


Bild 6.2: UHPC-Körper mit Wegaufnehmern und Temperaturfühler während der ersten und zweiten Förderperiode

Der Schädigungsfortschritt während eines Wöhlerversuchs mit einer Beanspruchung über dem Dauerfestigkeitsniveau kann durch die abnehmende Axialsteifigkeit erfasst werden. Auf der Basis der lastwechselabhängigen Erfassung von Längsdehnungen in der ausgeprägten Phase stabilen Risswachstums (Phase II) wurde der aus der Literatur für normalfesten und hochfesten Beton bekannte Zusammenhang zwischen der mittleren Steifigkeitsänderung je Lastwechsel und der Bruchlastspielzahl überprüft bzw. quantifiziert. Für verschiedene Beanspruchungsarten (Zugschwellbereich, Druckschwellbereich und Wechselbeanspruchungsbereich) wird in der Literatur ein konstanter mittlerer Steifigkeitsverlust pro Lastwechsel beschrieben. Die grundsätzliche Gültigkeit dieses Zusammenhangs wurde aufgrund der in der ersten Förderperiode bereits in einigen Wöhlerversuchen durchgeführten Verformungsmessungen auch für wechselbeanspruchten UHPC angenommen.

Da das zeitabhängige Verformungsverhalten an anderer Stelle des Schwerpunkts SPP 1182 untersucht wird bzw. wurde, sind keine eigenen Untersuchungen hierzu vorgenommen worden. Es wird auf die Ergebnisse des SPP 1182- Projektes Mu1368/9-1 „Materialgesetze für das Spannungs-Dehnungs-Zeitverhalten von UHPC“ zurückgegriffen.

7 Ermüdungsversuche

7.1 Wöhlerlinien

7.1.1 Allgemeines

Bis heute ist die „Wöhlerkurve“ eine grundlegende Größe zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens eines Werkstoffes. Sie zeigt (im Allgemeinen für einen sinusförmigen Belastungsverlauf) die Abhängigkeit der ertragenen Lastspielzahl von dem einwirkenden Spannungsniveau. Dabei wird entweder der Ober-, der Mittel- oder der Unterwert der Spannung konstant gehalten. Kann ein Spannungsniveau ermittelt werden, bei dem offensichtlich auch nach beliebig vielen Lastspielen kein Versagen auftritt, so wird es als Dauerfestigkeitsbereich des Baustoffes bezeichnet (DAfStb 1983).

Durch die Auswertung mehrerer Ermüdungsversuche wird aus dem Zusammenhang zwischen Schwingbreite $\Delta\sigma$ und ertragbarer Lastspielzahl N , dargestellt in logarithmischem Maßstab, als Regressionsgerade die so genannte Wöhlerlinie abgeleitet. Sie grenzt im $\Delta\sigma$ - $\log N$ -Diagramm die sich für das Festigkeitsverhalten ergebenden charakteristischen Bereiche voneinander ab.

Im Bild 7.1 ist eine Wöhlerlinie für einen metallischen Werkstoff im doppellogarithmischen Maßstab schematisch dargestellt. Dabei wird die Wöhlerlinie in drei Bereiche aufgeteilt. Die Kurzzeitfestigkeit (niederzyklische Ermüdungsfestigkeit) für Lastspielzahlen $N < 10^4$ liegt nahe an der statischen Beanspruchung der Werkstoffe und spielt im Zusammenhang mit dem Ermüdungsnachweis keine Rolle. Im Gegensatz hierzu spielen die Zeitfestigkeit (hochzyklische Ermüdungsfestigkeit) und die Dauerfestigkeit für den Ermüdungsnachweis eine größere Rolle (Zilch, Zehetmaier 2010).

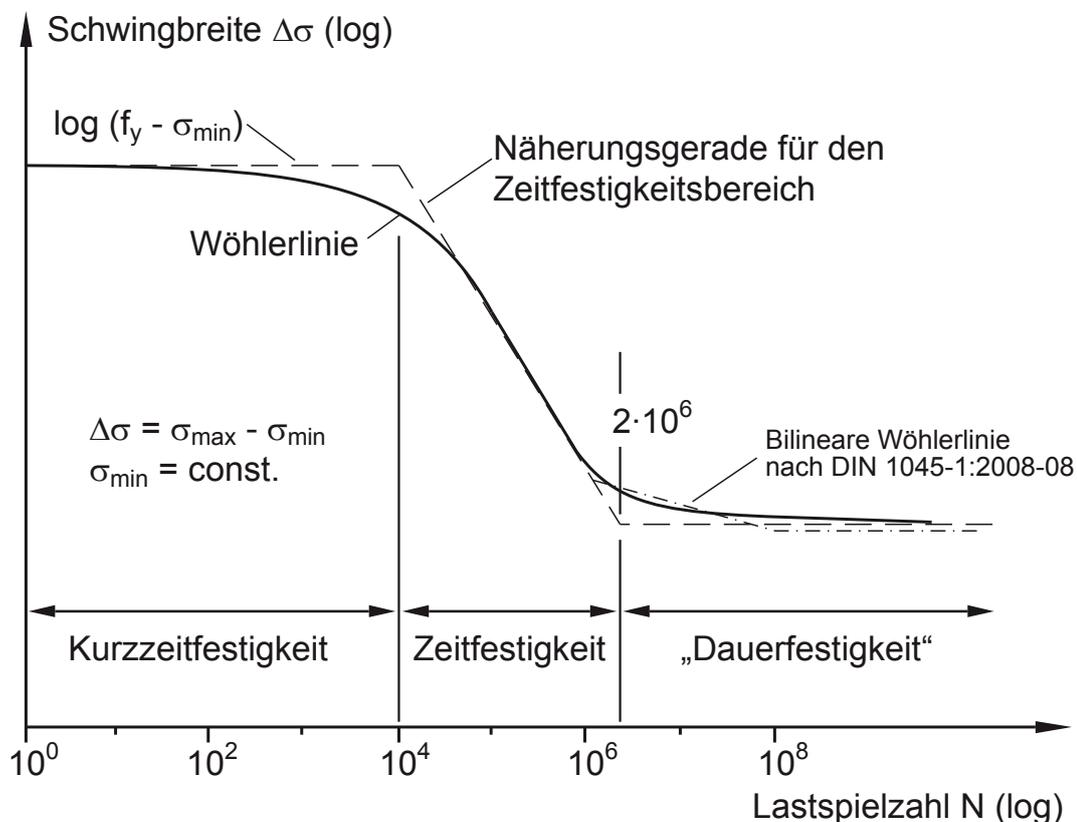


Bild 7.1: Wöhlerlinie am Beispiel metallischer Werkstoffe (schematisch) (aus Zilch, Zehetmaier 2010)

Die Dauerschwingfestigkeit bezeichnet denjenigen Bereich, in dem die Schwingbeanspruchung im Einstufenversuch theoretisch gerade noch unendlich oft ertragen werden kann. Bei metallischen Werkstoffen ist die Grenze der Dauerschwingfestigkeit genau definiert und liegt für Spann- und Betonstahl bei 2 Millionen Lastzyklen. Bei Beton ist diese Grenzlastspielzahl nicht definiert. Man spricht daher von einer Quasi-Dauerschwingfestigkeit. Wenn die Schwingbeanspruchung nach einer bestimmten Anzahl von Lastwechseln zum Versagen führt, spricht man von Zeitfestigkeit (Kessler-Kramer 2002).

Liegen hohe Spannungen σ bei gleichzeitig kleiner Lastwechselzahl N vor, spricht man von niederzyklischen Ermüdungsversuchen mit großen Amplituden (engl. low-cycle high amplitude fatigue), im umgekehrten Fall (kleine Spannungen σ bei gleichzeitig größerer Lastwechselzahl N) spricht man von hochzyklischen Ermüdungsversuchen mit kleinen Amplituden (engl. high-cycle low amplitude fatigue).

Der Unterschied zwischen den Wöhlerlinien metallischer Werkstoffe und Beton wird mit einem Blick auf das Bild 7.2 ersichtlich. Zum einen ist der Bereich der Dauerschwingfestigkeit nicht eindeutig nachgewiesen und zum anderen werden die Wöhlerlinien für Beton im halb-logarithmischen Maßstab dargestellt. Dabei wird die Lastwechselzahl N in Abhängigkeit der Oberspannung oder der Unterspannung, zum Teil auch in Abhängigkeit der Schwingweiten dargestellt.

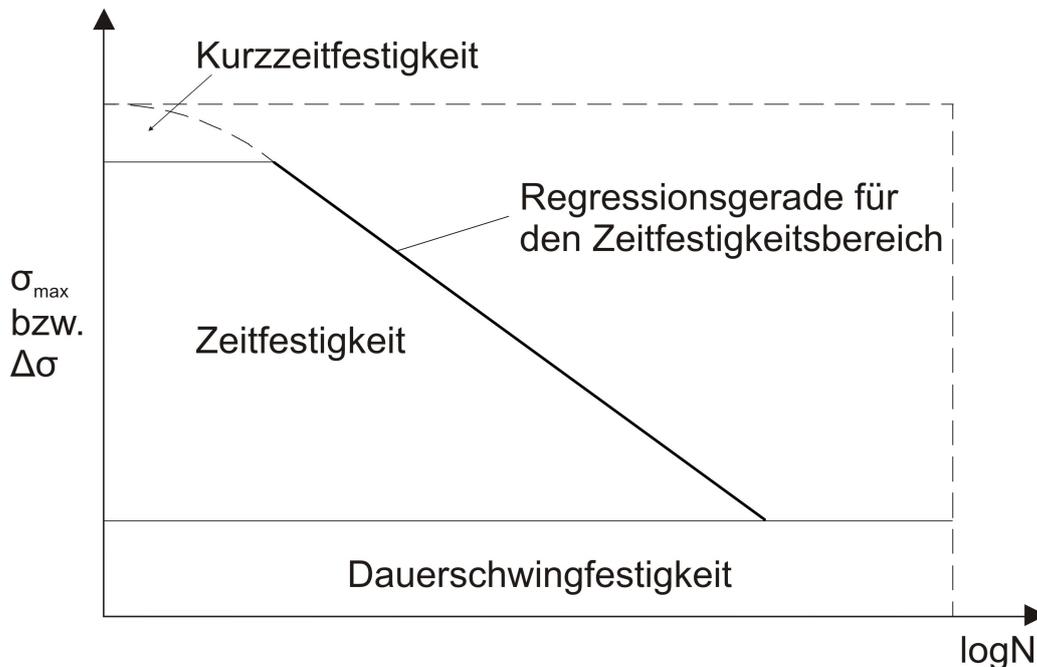


Bild 7.2: Wöhlerlinie am Beispiel Beton (schematisch) (aus Kessler-Kramer 2002)

Nach (Klausen 1978) beginnt der Bereich der Quasi-Dauerschwingfestigkeit bei Druckschwellbeanspruchung ab 10^{10} Lastwechsel (s. Bild 7.3). Dabei wird die Behauptung durch den Schnittpunkt der extrapolierten Regressionsgeraden bei verschiedenen Unterspannungen in diesem Bereich belegt. Wobei, wie im Bild 7.3 ersichtlich ist, die verschiedenen Regressionsgeraden sich in mindestens zwei Punkten schneiden.

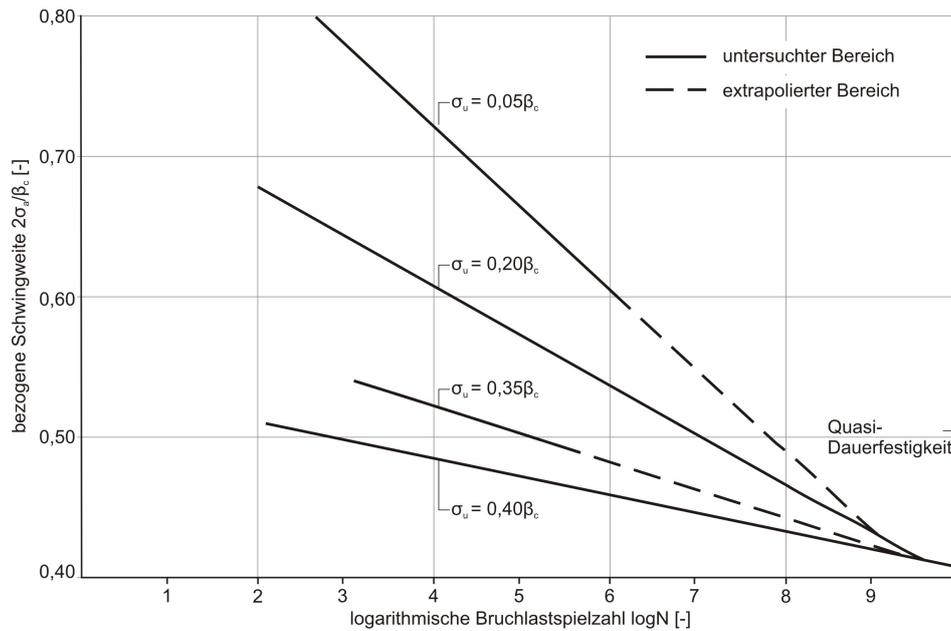


Bild 7.3: Wöhlerlinie von Beton unter einaxialer Druckschwellbeanspruchung (aus Klausen 1978)

Für den Zugschwell- und den Druck-Zug-Wechselbereich liegen nur wenige Ergebnisse aus Versuchen vor. Die in (Cornelissen, Timmers 1981) und (Cornelissen 1984) angegebenen Wöhlerlinien zeigen eine deutliche Abnahme der Ermüdungsfestigkeit beim Übergang von Zugschwell- zu Wechselbeanspruchung (s. Bild 7.4). Die Wöhlerlinien verlaufen im Gegensatz zu den Ergebnissen der Druckschwellversuche nahezu parallel, d.h. der Einfluss der Unterspannung auf die Ermüdungsfestigkeit ist schwächer ausgeprägt (DAfStb 1987).

Die Wöhlerlinien aus dem Bild 7.4 werden in den folgenden Abschnitten zum Vergleichen der Wöhlerlinien von Normalbeton mit UHPC verwendet.

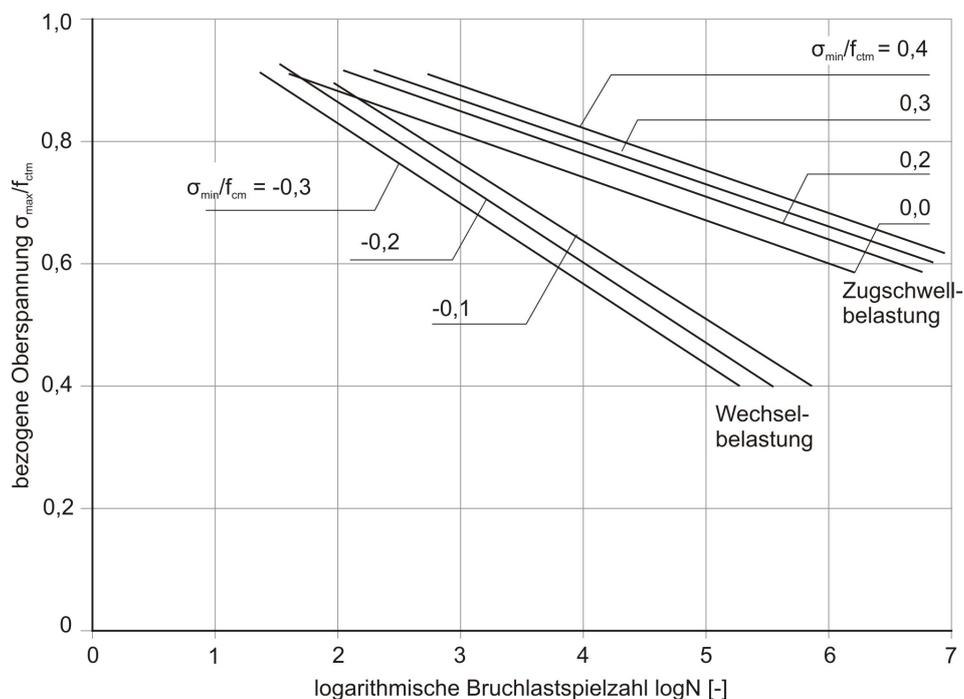


Bild 7.4: Wöhlerlinien bei Zugschwell- und Druck-Zug-Wechselbeanspruchung (aus Cornelissen 1984)

Da die experimentell ermittelten Ergebnisse generell starken Schwankungen unterliegen, werden Wöhlerlinien bestimmter Überlebenswahrscheinlichkeiten $P_{\dot{u}}$ ($P_{\dot{u}} = 1 - P_v$ mit $P_v =$ Versagenswahrscheinlichkeit) angegeben. Im Bild 7.5 sind Wöhlerlinien mit konstanter Unterspannung σ_{\min} für $P_{\dot{u}} = 5\%$, $P_{\dot{u}} = 50\%$ und $P_{\dot{u}} = 95\%$ dargestellt. Diese Diagramme werden auch S-P-N-Diagramme (S = Belastungsgrad, P = Überlebenswahrscheinlichkeit, N = Anzahl der Lastwechsel) genannt (Kessler-Kramer 2002).

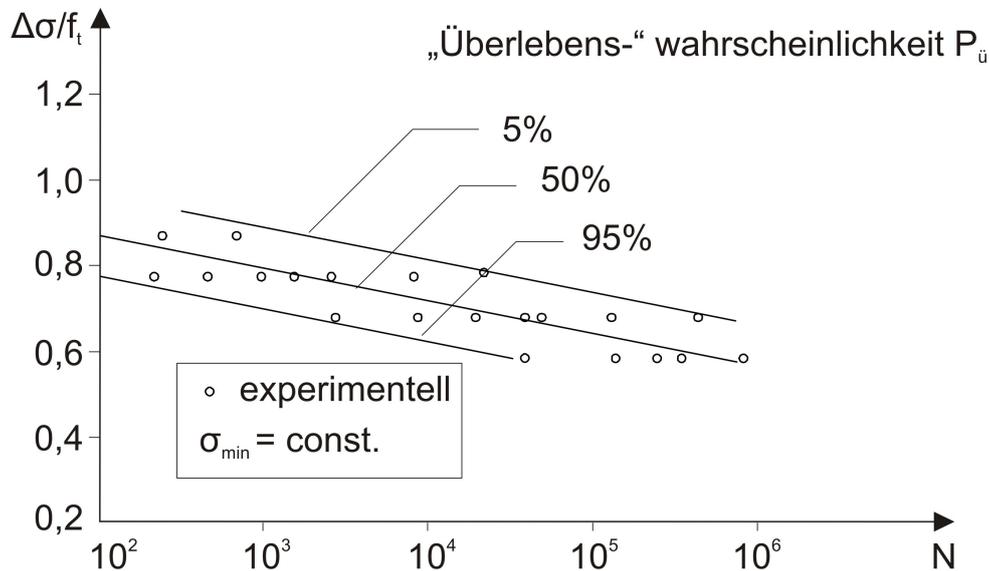


Bild 7.5: Wöhlerlinien verschiedener Überlebenswahrscheinlichkeiten bei einer konstanten Unterspannung (aus Kessler-Kramer 2002)

Die Ergebnisse aller durchgeführten Ermüdungsversuche sind tabellarisch in der Anlage 12.4 aufgeführt. Zusätzlich zu den erreichten Lastwechselzahlen (N und $\log N$) sind die genauen Bezeichnungen der Probennummern, die bezogene Unter- bzw. Oberspannung, die Prüffrequenz f und die Versagensart aufgeführt. Bei den Durchläufern ($N > 10^7$ bzw. $N > 10^8$) ist bei einigen Versuchen noch die maximal aufgenommene Zugkraft F_{\max} aufgeführt, da die Durchläufer nach dem Versuch noch statisch zu Bruch gezogen worden sind.

Die Wöhlerlinien aller Ermüdungsversuche sind in der Anlage 12.5 dargestellt.

7.1.2 Einflussfaktoren

7.1.2.1 Allgemeines

Wöhlerlinien des Betons werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst. In der Literatur sind folgende Einflussfaktoren aufgelistet (z.B. DAfStb 1983):

- Beanspruchungsart (Normalkraft, Biegung, Torsion)
- Beanspruchungsbereich (Zug- oder Druckschwellbeanspruchung, Wechselbeanspruchung)
- Größe des konstant gehaltenen Beanspruchungswertes (Ober-, Mittel- oder Unterspannung)
- Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit des Bauteils bzw. der Probe
- Eigenspannungen im Bauteil oder in der Probe
- Belastungsfrequenz
- Einflüsse aus Temperatur

Weitere Einflussfaktoren für den UHPC können z.B. das Schwinden, das Kriechen, der Luftporengehalt, der Fasergehalt und die Faserorientierung sein.

Der Einfluss der Beanspruchungsart ist hier nicht maßgebend, da alle Prüfkörper zentrisch und einaxial beansprucht wurden. Der Beanspruchungsbereich war bei allen Prüfkörpern im Druck-Zug-Wechselbereich.

7.1.2.2 Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit

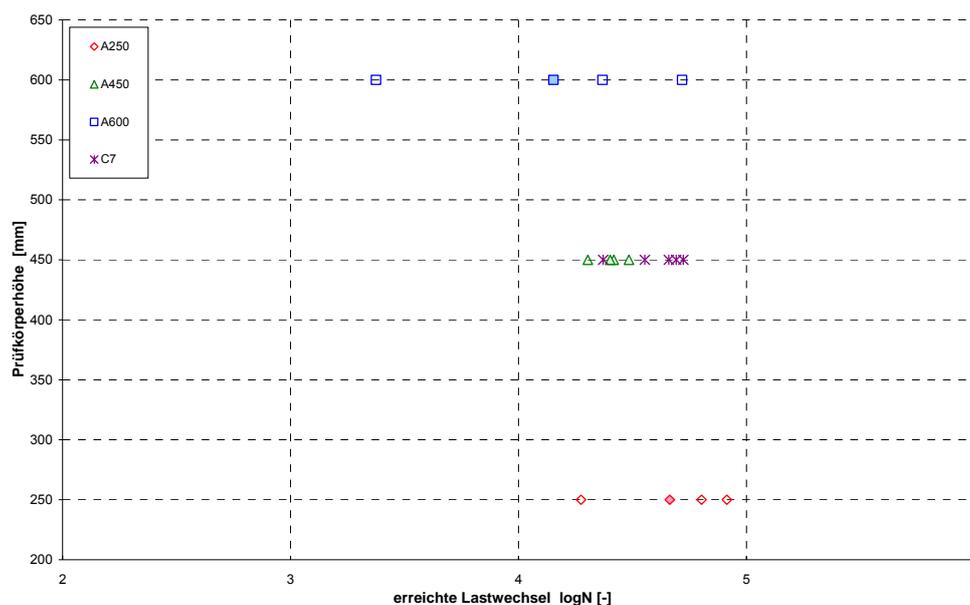
Die Streuung der Oberflächenbeschaffenheit der Proben wurde durch entsprechende Nachbehandlung und den Herstellungsprozess gering gehalten.

In einer Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München wurde für den ultrahochfesten Beton der Einfluss der Prüfkörperabmessungen ermittelt. Die Ergebnisse sind in (Tecusan 2009) ausführlich beschrieben. Im Folgenden werden Auszüge und die wichtigsten Ergebnisse aus (Tecusan 2009) dargestellt.

Für die Versuche der Bachelorarbeit wurde die Feinkornmischung M3Q mit Wärmebehandlung verwendet. Es wurden unterschiedliche Prüfkörperhöhen sowohl statisch als auch dynamisch untersucht. Dabei konnte ein Formfaktor für die statischen Zug- und Druckfestigkeiten ermittelt werden.

Die Ermüdungsversuche wurden alle bei einer bezogenen Zugspannung von $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ und einer bezogenen Druckspannung von $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$ (entspricht der Serie C7) durchgeführt. Die Prüffrequenz betrug dabei 10 Hz.

Im Bild 7.6 sind die erreichten Lastwechsel der unterschiedlichen Prüfkörperhöhen und der eigenen Versuche aus der Serie C7 dargestellt. Die Ergebnisse der Serien A250, A450 und A600 sind der Bachelorarbeit aus (Tecusan 2009) entnommen. Es ist anzumerken, dass die Prüfkörper der Serie A250 alle an der Einspannung versagten und somit für eine statistische Auswertung ausfallen. Die geringe Anzahl der Ermüdungsversuche lässt keine sichere Schlussfolgerung auf die Abhängigkeit der Prüfkörperhöhe schließen. Bei Betrachtung der erreichten Lastwechselzahlen der Prüfkörperhöhen 450 und 600 mm ist die Tendenz zu erkennen, dass mit zunehmender Prüfkörperhöhe die erreichte Lastwechselzahl abnimmt und die Streuung (aufgrund der erhöhten Wahrscheinlichkeit für Fehlstellen) zunimmt. Für eine genauere Aussage müssten jedoch weitere Versuche durchgeführt werden.



7.1.2.3 Größe des konstant gehaltenen Beanspruchungswertes

Eine Abhängigkeit der Unter- bzw. der Oberspannung ist vorhanden. Bei den durchgeführten Versuchen ist zu erkennen, dass bei konstanter Druckunterspannung und bei steigender Zugoberspannung ($\sigma_c/f_{cm} > 0$) die Bruchlastwechsel sinken. Ebenso sinken die Bruchlastwechsel bei konstanter Zugoberspannung und betragsmäßig steigender Druckunterspannung ($\sigma_c/f_{cm} < 0$). Dieser Effekt ist nicht nur im Druck-Zug-Wechselbereich und beim UHPC zu beobachten. Bereits in (Klausen 1978) wird für den Normalbeton davon berichtet. Bei Druckschwellversuchen mit UHPC wird derselbe Effekt beschrieben (Wefer 2010).

7.1.2.4 Belastungsfrequenz

Der Einfluss der Belastungsfrequenz wurde bereits in einigen Veröffentlichungen diskutiert ((Wefer 2010), (König et al. 2006), (Kessler-Kramer 2002), (CEB-FIP 1988), (Cornelissen, Reinhardt 1984), (RILEM 1984), (Holmen 1979) und (DAfStb 1975)).

Im Folgenden soll ein kleiner Überblick über die feststehenden Erkenntnisse erfolgen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Belastungsfrequenz einen geringen Einfluss auf die ertragbaren Lastwechsel in Abhängigkeit der Unter- bzw. Oberspannung hat.

Die bisherigen Untersuchungen über den Einfluss der Belastungsfrequenz erfolgten jedoch zum Größtenteils bei Druckschwellversuchen für Normalbeton. Der Einfluss der Belastungsfrequenz wurde im Zugschwellbereich bzw. im Druck-Zug-Wechselbereich für Normalbeton nicht ausführlich untersucht.

Im Allgemeinen ist bei Druckschwellversuchen für Normalbeton eine Verringerung der ertragbaren Lastwechsel mit kleiner werdender Belastungsfrequenz zu verzeichnen. Die Änderung der Frequenz zwischen 1 und 15 Hz hat jedoch nur geringen Einfluss, wenn die maximale Spannung etwa 75% bzw. 80% der Druckfestigkeit nicht überschreitet.

In (DAfStb 1975) wird davon berichtet, dass bei einer Druckunterspannung $\sigma_c/f_{cm} > -0,8$ die Belastungsfrequenz keinen Einfluss auf die ertragbare Lastwechselzahl ausübt. Dabei wurden Versuche mit 1 Hz, 10 Hz und 200 Hz an Normalbeton durchgeführt. Das bei einer Unterspannung $\sigma_c/f_{cm} < -0,8$ ein Einfluss vorhanden ist, wird dadurch begründet, dass bei 80% der Druckfestigkeit die Dauerstandfestigkeit des Normalbetons erreicht wird. Eine Reduzierung der Frequenz in diesem Bereich hat eine Reduzierung der ertragbaren Lastwechsel zur Folge.

Eine ähnliche Schlussfolgerung ist in (Holmen 1979) zu finden. Hier wird beschrieben, dass bei einer Druckunterspannung $\sigma_c/f_{cm} > -0,75$ die Änderung der Belastungsfrequenz zwischen 0,8 Hz und 15 Hz keinen Einfluss auf die ertragbare Lastwechselzahl hat. Der Einfluss der Belastungsfrequenz bei einer Unterspannung $\sigma_c/f_{cm} < -0,75$ wird hier jedoch durch das Kriechen des Betons begründet.

Die einzigen Untersuchungen zum Einfluss der Belastungsfrequenz im Zugschwell- bzw. Druck-Zug-Wechselbereich an Normalbeton werden in (Cornelissen, Reinhardt 1984) aufgeführt. Dabei wird berichtet, dass eine Verringerung der Prüffrequenz um den Faktor 100 (von 6 Hz auf 0,06 Hz) eine Verringerung der ertragbaren Lastwechsel um den Faktor 100 zur Folge hat. Jedoch werden die erreichten Lastwechselzahlen in Abhängigkeit der sekundären Kriechrate dargestellt.

Für den UHPC gibt es bisher nur Ermüdungsversuche im Druckschwellbereich. Die Ergebnisse sind in (Wefer 2010) dargestellt. Der Einfluss der Belastungsfrequenz auf die ertragbaren Lastwechselzahlen wurde dabei an einigen Proben (10 Hz und 65 Hz) untersucht. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein geringer Einfluss der Belastungsfrequenz vorhanden ist.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde angestrebt, die Versuche bei einer Prüffrequenz von $f = 10$ Hz durchzuführen. Aufgrund der unterschiedlichen Prüfmaschinen und Schwingbreiten konnte dies nicht immer realisiert werden. Die in den Versuchen verwendete Prüffrequenz f ist in der Anlage 12.4 mit aufgeführt.

Einige Versuche wurden, wie im Abschnitt 6 bereits beschrieben, mit einem Hochfrequenzpulsator bei einer Prüffrequenz von $f = 100$ Hz durchgeführt.

Auf die Ergebnisse der Wöhlerversuche und einen eventuellen Einfluss der Prüffrequenz wird später eingegangen.

7.1.2.5 Einflüsse aus Temperatur

Der Einfluss der Wärmebehandlung des UHPC auf die statische Druckfestigkeit wurde bereits im Bild 5.1 deutlich gezeigt. Aus diesem Grund wurden zusätzlich zu den Hauptversuchen beim feinkörnigen UHPC Proben ohne Wärmebehandlung hergestellt, welche anschließend in Druck-Zug-Wechselversuchen untersucht wurden.

Während den Ermüdungsversuchen wurden keine gravierenden Temperaturanstiege gemessen. Die Auswertung der Oberflächentemperatur während den Ermüdungsversuchen ergab einen kurzen Temperaturanstieg von ca. 5-10 K kurz vor dem Bruch des Prüfkörpers. Dies jedoch nur bei den Versuchen mit großen Schwingbreiten. Die Oberflächentemperatur der Prüfkörper während den Versuchen lag in der Regel zwischen 25°C und 30°C.

Einen Temperaturanstieg wie in (Wefer 2010) beschrieben von 60 K bei einer Prüffrequenz von $f = 10$ Hz konnte nicht festgestellt werden.

7.1.2.6 Schwinden, Kriechen und Dauerstandverhalten

Die Prüfkörper bei den eigenen Ermüdungsversuchen wurden generell im Alter von über 100 Tagen geprüft. Der Einfluss aus Schwinden und Kriechen ist in der Regel zu diesem Belastungsbeginn gering.

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Nachhaltiges Bauen mit Ultra-Hochfestem Beton (UHPC)“ wurde an der Universität Karlsruhe ein Forschungsvorhaben mit dem Titel „Materialgesetze für das Spannungs-Dehnungs-Zeitverhalten von ultra-hochfestem Beton“ durchgeführt. Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung geeigneter Materialgesetze. Dafür wurden umfassende Schwind- und Kriechversuche sowohl für den feinkörnigen als auch für den grobkörnigen UHPC durchgeführt. Die ersten Ergebnisse sind in (Müller, Burkart 2007) und (Müller, Burkart 2009) zusammengefasst, welche im Folgenden kurz wieder gegeben werden.

Die Schwindverformungen des UHPC sind in der Regel nach 100 Tagen bei Proben ohne Wärmebehandlung ausgeklungen. Bei Proben mit Wärmebehandlung geschieht dies noch schneller.

Die Kriechversuche für den feinkörnigen UHPC ohne Wärmebehandlung sind abgeschlossen und zeigen, ein sehr geringes Kriechmaß bei einem Belastungsbeginn nach 100 Tagen. Erste Ergebnisse für den grobkörnigen UHPC zeigen eine ähnliche Tendenz. Die Versuche an Prüfkörpern mit Wärmebehandlung werden in einer weiteren Förderperiode untersucht.

Generell kann zusammengefasst werden, dass die Einflüsse aus Schwinden und Kriechen vernachlässigbar gering sind, da alle Ermüdungsversuche in einem Alter von über 100 Tagen geprüft wurden. Dies wird auch in (Wefer 2010) bei Ermüdungsversuchen am UHPC im Druckschwellbereich festgestellt.

Das Dauerstandverhalten von UHPC wurde in (Müller, Burkart 2009) ebenso beschrieben. Demnach liegt die Dauerstandfestigkeit beim feinkörnigen UHPC ohne Wärmebehandlung

bei 80% der Kurzzeitfestigkeit und beim grobkörnigen UHPC ohne Wärmebehandlung zwischen 85% und 90% der Kurzzeitfestigkeit.

Es wird im Folgenden angenommen, dass die Dauerstandfestigkeit beim feinkörnigen UHPC mit und ohne Wärmebehandlung auf der sicheren Seite liegend bei 80% und beim grobkörnigen UHPC bei 85% der Kurzzeitfestigkeit liegt.

7.1.2.7 Luftporengehalt

Bereits in (de Antrim, McLaughlin 1959) wurden Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten im Druckschwellbereich von Normalbeton mit hohem Luftporengehalt durchgeführt. Es wurden dabei Ermüdungsversuche an zwei Betonsorten durchgeführt. Die erste Betonsorte enthielt natürliche Luftporen während die zweite Betonsorte künstliche mit Luftporenbildnern erzeugte Luftporen enthielt. Die 28-Tage Druckfestigkeit wurde dabei auf denselben Wert ($f_{cm,cyl} \approx 28$ MPa) festgelegt. Der Luftporengehalt beim Normalbeton betrug bei den Versuchen ca. 0,9% während der Luftporengehalt beim Luftporenbeton ca. 8,3% betrug.

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche sind in Bild 7.7 dargestellt. Alle Druckschwellversuche wurden bei einer Unterspannung von ca. 2% der Druckfestigkeit durchgeführt. Die Oberspannung betrug ca. 50, 60, 70, 80 oder 90% der Druckfestigkeit.

Es ist festzustellen, dass sich die beiden Regressionsgeraden schneiden. Die Steigung der Regressionsgerade für den Luftporenbeton ist kleiner als für den Normalbeton. Des Weiteren ist festzuhalten, dass die Streuung des Luftporenbetons geringer ist als beim Normalbeton. Es ist anzunehmen, dass durch das Einbringen des Luftporenbildners die natürlichen Störungen und Mikrorisse kontrollierbar sind.

Die Einzelergebnisse der Ermüdungsversuche des Luftporenbetons fügen sich allgemein sehr gut in die Ergebnisse des Normalbetons ein. Daraus lässt sich schließen, dass kein signifikanter Unterschied zwischen dem Normalbeton und dem Luftporenbeton besteht.

Der Luftporengehalt für die drei UHPC Mischungen, bei den eigenen Versuchen, betrug beim M2Q ca. 4,2% ($s_x = 0,67\%$; $v_x = 16,10\%$), M3Q ca. 5,2% ($s_x = 0,52\%$; $v_x = 9,91\%$) und beim B5Q ca. 1,9% ($s_x = 0,33\%$; $v_x = 17,23\%$).

Auf die Ergebnisse der Wöhlerversuche und einen eventuellen Einfluss des Luftporengehaltes wird später eingegangen.

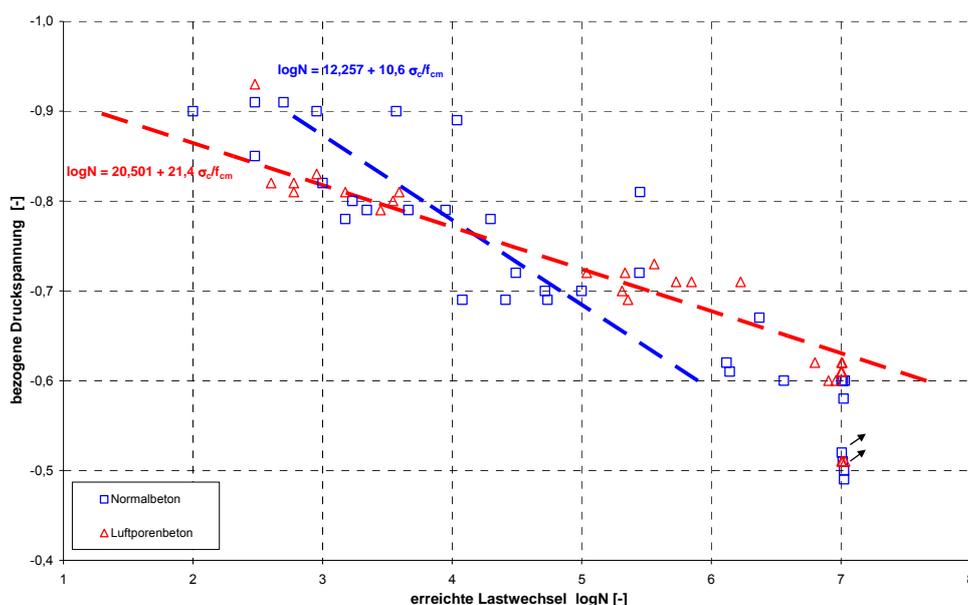


Bild 7.7: Wöhlerlinien für Normal- und Luftporenbeton im Druckschwellbereich (aus de Antrim, McLaughlin 1959)

7.1.3 Regressionsanalyse

Die Ermittlung der Regressionsgeraden bzw. der Wöhlerlinien wird, wie bereits in vielen Ermüdungsversuchen angewandt, mit Hilfe der linearen Regression durchgeführt. Dabei werden zwei unterschiedliche Methoden vorgestellt, die zum selben Ergebnis führen. Die erste und ausführlichere Methode nach (Wilrich, Henning 1998) wird im Folgenden kurz zusammengefasst.

Nach (Wilrich, Henning 1998) ist die Regressionsanalyse ein statistisches Verfahren zur Untersuchung der Abhängigkeit einer quantitativen Zielgröße Y (hier: die ertragbare Lastwechselzahl N) von einer quantitativen Einflussgröße X (hier: die bezogene Druckunterspannung σ_c/f_{cm}) (s. Bild 7.8).

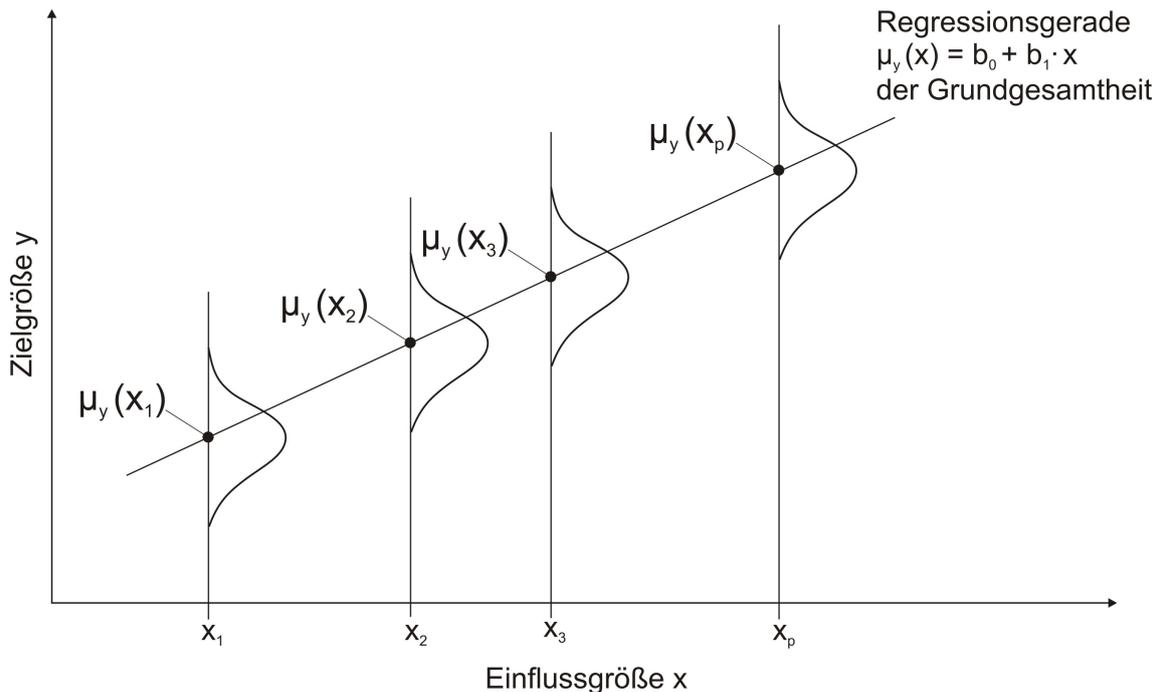


Bild 7.8: Regressionsgerade bei der Anwendung der einfachen linearen Regression (aus Wilrich, Henning 1998)

Bei der Anwendung der Gleichungen nach (Wilrich, Henning 1998) werden zunächst die gesamten Versuche berücksichtigt. Sowohl die Durchläufer, als auch die Prüfkörper mit Druck- oder Zugversagen. Es wird mit Hilfe der gesamten Versuchserie Regressionsgeraden in Abhängigkeit der bezogenen Oberspannung σ_c/f_{ctm} (Geradenscharen) berechnet.

Die Regressionsgerade berechnet sich zu:

$$\log N = b_0 + b_1 \cdot (\sigma_c / f_{cm}) \quad [-] \quad (7.1)$$

Mit Hilfe der aus den Versuchen ermittelten Ergebnissen (vgl. Tabelle 7.1) werden anschließend der Stichprobenumfang, Hilfssummen, Mittelwerte, Varianzen, die Kovarianz und die Regressionskoeffizienten b_0 und b_1 für jede Geradenschar ermittelt.

Tabelle 7.1: Wertetabelle bei der Berechnung der Regressionsgeraden (aus Wilrich, Henning 1998)

Wert der Variablen x (σ_c/f_{cm})	Beobachtungswerte von Y (logN)	Anzahl der Beobach- tungswerte von Y
x_1	$y_{11}, y_{12} \dots y_{1n_1}$	n_1
x_2	$y_{21}, y_{22} \dots y_{2n_2}$	n_2
...
x_i	$y_{i1}, y_{i2} \dots y_{in_i}$	n_i
...
x_k	$y_{k1}, y_{k2} \dots y_{kn_k}$	n_k

Die benötigten Gleichungen lauten:

Stichprobenumfang:

$$N = \sum_{i=1}^k n_i \quad [-] \quad (7.2)$$

Hilfssummen:

$$S_x = \sum_{i=1}^k (n_i \cdot x_i); \quad S_y = \sum_{i=1}^k \sum_{v=1}^{n_i} (y_{iv});$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^k (n_i \cdot x_i^2); \quad S_{yy} = \sum_{i=1}^k \sum_{v=1}^{n_i} (y_{iv}^2); \quad [-] \quad (7.3)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^k \sum_{v=1}^{n_i} (x_i \cdot y_{iv})$$

Mittelwerte:

$$\bar{x} = S_x/N; \quad \bar{y} = S_y/N \quad [-] \quad (7.4)$$

Summe der quadrierten Abweichungen:

$$Q_{xx} = S_{xx} - S_x^2/N; \quad Q_{yy} = S_{yy} - S_y^2/N; \quad Q_{xy} = S_{xy} - (S_x \cdot S_y)/N \quad [-] \quad (7.5)$$

Varianzen:

$$s_x^2 = Q_{xx}/(N-1); \quad s_y^2 = Q_{yy}/(N-1) \quad [-] \quad (7.6)$$

Kovarianz:

$$s_{xy} = Q_{xy}/(N-1) \quad [-] \quad (7.7)$$

Regressionskoeffizienten der Stichprobe:

$$b_1 = Q_{xy}/Q_{xx}; \quad b_0 = \bar{y} - b_1 \cdot \bar{x} \quad [-] \quad (7.8)$$

Restvarianz:

$$s^2 = \frac{Q_{yy}}{N-2} \cdot \left(1 - \frac{Q_{xy}^2}{Q_{xx} \cdot Q_{yy}} \right) \quad [-] \quad (7.9)$$

Bestimmtheitsmaß:

$$B = \frac{Q_{xy}^2}{Q_{xx} \cdot Q_{yy}} \quad [-] \quad (7.10)$$

Bei der zweiten vereinfachten Methode zur Berechnung der Regressionsgeraden nach (Heinhold, Gaede 1979) werden lediglich die Mittelwerte jeder Laststufe zur Berechnung herangezogen.

Mittelwerte:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k y_i \quad [-] \quad (7.11)$$

Regressionskoeffizienten der Stichprobe:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^k [(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}; \quad b_0 = \bar{y} - b_1 \cdot \bar{x} \quad [-] \quad (7.12)$$

Die Ergebnisse beider Methoden führen zu nahezu denselben Ergebnissen, so dass die Auswertung der Ermüdungsversuche bzw. die Ermittlung der Wöhlerlinien mit Hilfe der zweiten vereinfachten Methode nach (Heinhold, Gaede 1979) erfolgt.

Zusätzlich zu den Regressionsgeraden sind die zweiseitig abgegrenzten statistischen Anteilsbereiche bei Normalverteilung von Interesse. Ein zweiseitiger statistischer Anteilsbereich (früher: statistischer Toleranzbereich) ergibt sich dadurch, dass Stichprobenergebnisse in zwei Stichprobenfunktionen eingesetzt werden. Diese berechnen sich nach (Wilrich, Henning 1998) mit Hilfe folgender Gleichungen.

Anteilsgrenzen des zweiseitigen statistischen Anteilbereichs:

$$a_u = \bar{x} - k_{2u} \cdot s; \quad a_o = \bar{x} + k_{2u} \cdot s \quad [-] \quad (7.13)$$

mit:

$$k_{2u} = r \cdot v \quad [-] \quad (7.14)$$

Die Faktoren r und v können mit Hilfe von Tabellenwerten aus (Wilrich, Henning 1998) ermittelt werden.

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung aller Ermüdungsversuche nach (Wilrich, Henning 1998) sind in der Anlage 12.6 zusammengefasst.

7.1.4 Ermüdungsversuche am feinkörnigen UHPC (M2Q bzw. M3Q)

7.1.4.1 Hauptversuche M2Q/M3Q mSF mWB (Serie HV bzw. MHV)

Wie bereits bei (Rings 1986), wird auch in dieser Arbeit bei der grafischen Darstellung der Ergebnisse davon ausgegangen, dass sich die Wöhlerlinien mit konstanter Unterspannung im halblogarithmischen Maßstab als Geraden ergeben. Diese Annahme ist aufgrund früherer Ergebnisse bei Normalbeton im Druck-Zug-Wechselbereich (Cornelissen, Reinhardt 1984) und nach eigenen Überprüfungen am UHPC gerechtfertigt.

Bei Druckschwellversuchen wird üblicherweise die bezogene Schwingbreite, d.h. die Differenz aus bezogener Ober- und Unterspannung, über die erreichten Lastwechselzahlen aufgetragen. Liegt eine Wechselbeanspruchung vor, so könnten die Ergebnisse unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Vorzeichen auf gleiche Weise dargestellt werden. Dabei würde die Schwingbreite sowohl einen Anteil aus Druck- als auch aus Zugbeanspruchung beinhalten. Um den Einfluss der jeweiligen Anteile besser erkennen zu können, wurde statt der bezogenen Schwingbreite die bezogene Unterspannung σ_c/f_{ctm} (Druck) über die erreichten Lastwechselzahlen aufgetragen. Die bezogene Oberspannung σ_c/f_{ctm} (Zug) diene als Scharparameter (s. a. Rings 1986).

Zusätzlich zu den Ergebnissen aus den Ermüdungsversuchen des ultrahochfesten Betons (UHPC) werden in den folgenden Bildern auch jeweils die Wöhlerlinien für den Normalbeton (NSC) aus (Cornelissen 1984) dargestellt (s. a. Bild 7.4). In (Cornelissen 1984) wird für die Wöhlerlinien des Normalbetons folgender Ansatz bei Ermüdungsversuchen im Druck-Zug-Wechselbereich vorgeschlagen:

$$\log N = 9,36 - 7,93 \cdot \left| \sigma_c / f_{ctm} \right| - 2,59 \cdot \left| \sigma_c / f_{ctm} \right| \quad [-] \quad (7.15)$$

Des Weiteren sind in den folgenden Bildern die zugehörigen Gleichungen zu den Wöhlerlinien (Regressionsgeraden) des UHPC aufgeführt. Sowohl die erreichten Lastwechsel der einzelnen Versuche, als auch die jeweiligen Mittelwerte (gefüllte Markierung) der Lastkombinationen sind in den Diagrammen markiert. Versuchskörper, die nach 10^7 bzw. 10^8 Lastwechseln nicht versagten wurden abgebrochen und als „Durchläufer“ bezeichnet. Diese sind in den Diagrammen nicht gesondert gekennzeichnet. Eine Auflistung der Durchläufer ist in der Anlage 12.4 zu finden. Durchläufer sind generell bei der Berechnung der Regressionsgeraden mit ihrer erreichten Bruchlastspielzahl berücksichtigt. Sind allerdings bei verschiedenen Druckunterspannungen Durchläufer aufgetreten, so wurden die Durchläufer der Versuchsreihe mit betragsmäßig geringerer bezogener Unterspannung außer Acht gelassen. Wie bereits auch in (Wefer 2010) liegt die Begründung darin, dass die Streuungen der Ermüdungsversuche durch die Streuungen der Kurzzeitfestigkeit beeinflusst werden (vgl. Holmen 1979). Demnach kann gefolgert werden, dass eine zu geringe Bruchlast zur Festlegung des Beanspruchungsniveaus angenommen wurde. Bei den eigenen Versuchen ist dabei die Streuung der Zugfestigkeit maßgebend.

Im Bild 7.9 sind die Ergebnisse der Hauptversuche (HV bzw. MHV) der feinkörnigen UHPC Mischung in Abhängigkeit der erreichten Lastwechselzahlen für unterschiedlich bezogene Oberspannungen σ_c/f_{ctm} dargestellt.

Die Streuungen der Ermüdungsversuche sind deutlich erkennbar. Zusätzlich werden die Wöhlerlinien weiter modifiziert, da die nachträgliche Berücksichtigung von Durchläufern und Versuchen mit Druckversagen sinnvoll erscheint. Als erstes werden bei der Versuchsserie mit einer Oberspannung von $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ die Versuche mit Durchläufern bei den bezogenen Druckspannungen von 0% und 10% zur Auswertung nicht mit einbezogen, da bereits bei 30% der Druckspannung Durchläufer auftraten. Zum anderen wurden die drei Versuchsreihen mit einer Oberspannung von $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$, $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ und $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ und einer Unterspannung von $\sigma_c/f_{ctm} = -0,7$ aus der Auswertung ausgelassen, da alle Versuche auf Druck versagten.

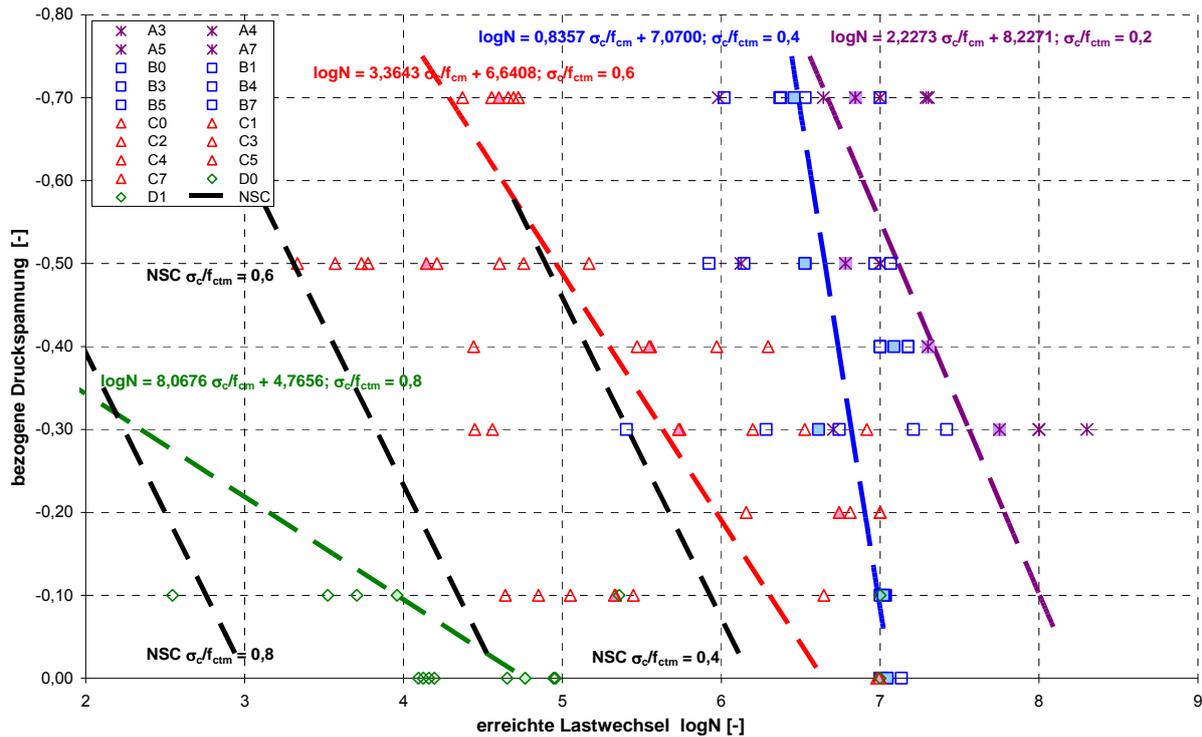


Bild 7.9: Wöhlerlinien des UHPC (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$)

Nach den Modifikationen und der manuellen Korrektur an den Wöhlerlinien ergibt sich ein neues Gesamtbild der Wöhlerlinien, welche in Bild 7.10 dargestellt wird. Zur besseren Übersicht sind die einzelnen Wöhlerlinien in der Anlage 12.5.4 nochmals dargestellt.

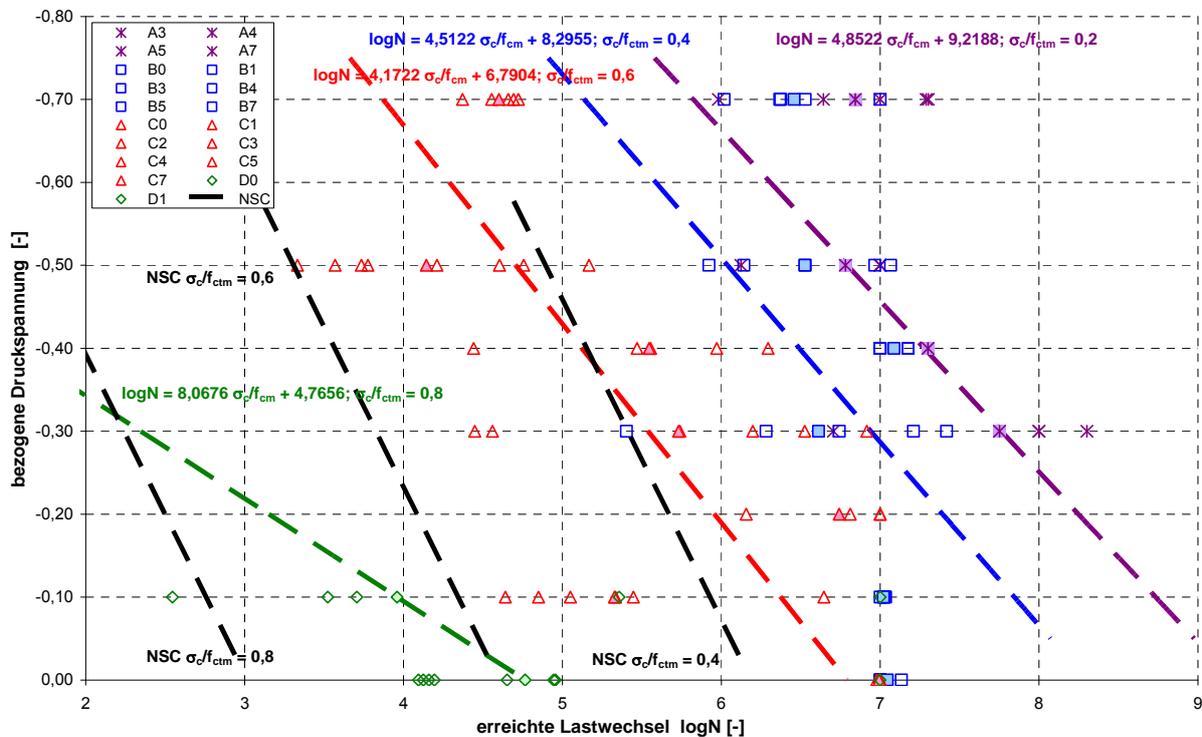


Bild 7.10: Modifizierte Wöhlerlinien des UHPC (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$)

Während die Wöhlerlinien für die Oberspannungen $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$, $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ und $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ nahezu parallel verlaufen ist erkennbar, dass bei Vergrößerung der Oberspannungen die Wöhlerlinien flacher werden. Dies hat in diesem Fall zwei Gründe. Zum Einen sind weniger Versuchsergebnisse vorhanden und zum anderen sind die Streuungen bei der Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$ sehr groß, da der Einfluss der Streuung der Zugfestigkeit in diesem Lastniveau eine deutlichere Rolle spielt.

Die zugehörigen Gleichungen und die Anteilsbereiche der modifizierten Wöhlerlinien sind im Folgenden nochmals kurz aufgeführt:

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$:

$$\log N^{50\%} = 9,2188 - 4,8522 \cdot |\sigma_c/f_{cm}|; \quad \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,4059 \quad [-] \quad (7.16)$$

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$:

$$\log N^{50\%} = 8,2955 - 4,5122 \cdot |\sigma_c/f_{cm}|; \quad \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,4863 \quad [-] \quad (7.17)$$

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$:

$$\log N^{50\%} = 6,7904 - 4,1722 \cdot |\sigma_c/f_{cm}|; \quad \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,6318 \quad [-] \quad (7.18)$$

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$:

$$\log N^{50\%} = 4,7656 - 8,0676 \cdot |\sigma_c/f_{cm}|; \quad \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,3885 \quad [-] \quad (7.19)$$

Diese vier Gleichungen werden bei der Untersuchung der Einflussfaktoren zum Vergleich herangezogen.

7.1.4.2 Einfluss des konstant gehaltenen Beanspruchungswertes

Der Einfluss der konstant gehaltenen Beanspruchung ist aus dem Bild 7.10 ersichtlich. Sowohl der Einfluss der Unterspannung als auch der Oberspannung ist deutlich erkennbar.

Bei Betrachtung der Wöhlerlinien und der Annahme einer konstanten Unterspannung σ_c/f_{cm} (Druck) und einer kontinuierlichen Erhöhung der bezogenen Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} > 0$ (Zug) ist zu erkennen, dass die Lastwechselzahlen geringer werden. Des Weiteren ist zu beobachten, dass bei Erhöhung der bezogenen Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} > 0$ (Zug) die erreichten Lastwechsel überproportional abnehmen. Der Grund hierfür ist sicherlich die Streuung der Kurzzeitzugfestigkeit. Bei geringer bezogener Zugspannung ist die Auswirkung auf den Ermüdungsversuch geringer als bei hohen bezogenen Zugspannungen nahe der Zugfestigkeit.

7.1.4.3 Einfluss der Stahlfasern (M2Q oSF mWB, Serie OF)

Im Bild 7.11 sind die Wöhlerlinien für die Serie M2Q oSF mWB (feinkörniger UHPC ohne Stahlfasern und mit Wärmebehandlung) für die beiden bezogenen Oberspannungen $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ dargestellt. Zum besseren Vergleich sind zusätzlich zu den Wöhlerlinien aus Normalbeton (schwarz gestrichelt) die beiden Wöhlerlinien der Hauptversuche MHV (punktiert) dargestellt.

Wie zu erwarten war, sind die ertragbaren Lastwechselzahlen des UHPC im Vergleich zum Normalbeton höher. Bei einer bezogenen Oberspannung von $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ beträgt der Faktor ca. 100 während für eine geringere Oberspannung der Faktor ca. 10 beträgt. Die Neigungen der Regressionsgeraden laufen nahezu zueinander und zum Normalbeton parallel.

Im Vergleich zu den Hauptversuchen ist ersichtlich, dass die Streuungen geringer sind. Zudem fallen die unterschiedlichen Neigungen auf. Die ertragbaren Lastwechsel für UHPC ohne Stahlfasern sind für geringe Zugoberspannungen um den Faktor 10 geringer als für

UHPC mit Stahlfasern. Demzufolge ist ein geringer Einfluss der Stahlfasern für das Ermüdungsverhalten des UHPC vorhanden.

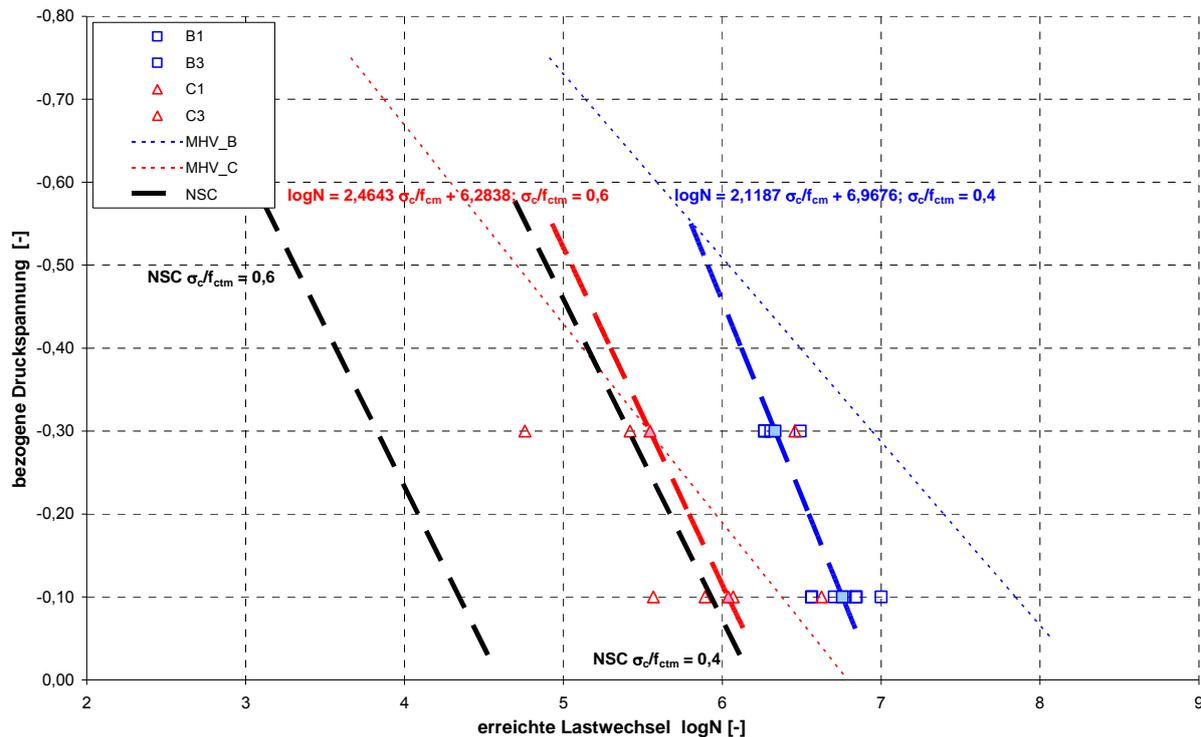


Bild 7.11: Wöhlerlinien des UHPC (M2Q oSF mWB (OF), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)

Die zugehörigen Gleichungen der Wöhlerlinien und ihre Anteilsbereiche sind im Folgenden aufgeführt:

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$:

$$\log N^{50\%} = 6,9676 - 2,1187 \cdot |\sigma_c/f_{ctm}|; \quad \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,2469 \quad [-] \quad (7.20)$$

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$:

$$\log N^{50\%} = 6,2838 - 2,4643 \cdot |\sigma_c/f_{ctm}|; \quad \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,6544 \quad [-] \quad (7.21)$$

7.1.4.4 Einfluss der Wärmebehandlung (M2Q mSF oWB, Serie WB)

Die Ergänzungsversuche mit Stahlfasern (aber ohne Wärmebehandlung) zeigen ein etwas geändertes Ermüdungsverhalten (s. Bild 7.12). Die Wöhlerlinie für geringe Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ verläuft steiler als die Wöhlerlinie der Hauptversuche. Des Weiteren ist ein Rückgang der ertragbaren Lastwechselzahlen für eine höhere Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ zu beobachten. Darüber hinaus scheinen die Streuungen für diese Versuchsserie (WB) deutlich geringer als bei den Hauptversuchen zu sein.

Zum besseren Vergleich sind zusätzlich zu den Wöhlerlinien aus Normalbeton (schwarz gestrichelt) die beiden Wöhlerlinien der Hauptversuche MHV (punktiert) dargestellt. Die ertragbaren Lastwechsel für UHPC ohne Wärmebehandlung sind bei allen Lastkombinationen um den Faktor 5 geringer als für UHPC mit Wärmebehandlung. Ein geringer Einfluss der Wärmebehandlung scheint für das Ermüdungsverhalten des UHPC vorhanden zu sein. Eine genauere Aussage kann aufgrund der geringen Anzahl der Versuche jedoch nicht getroffen werden.

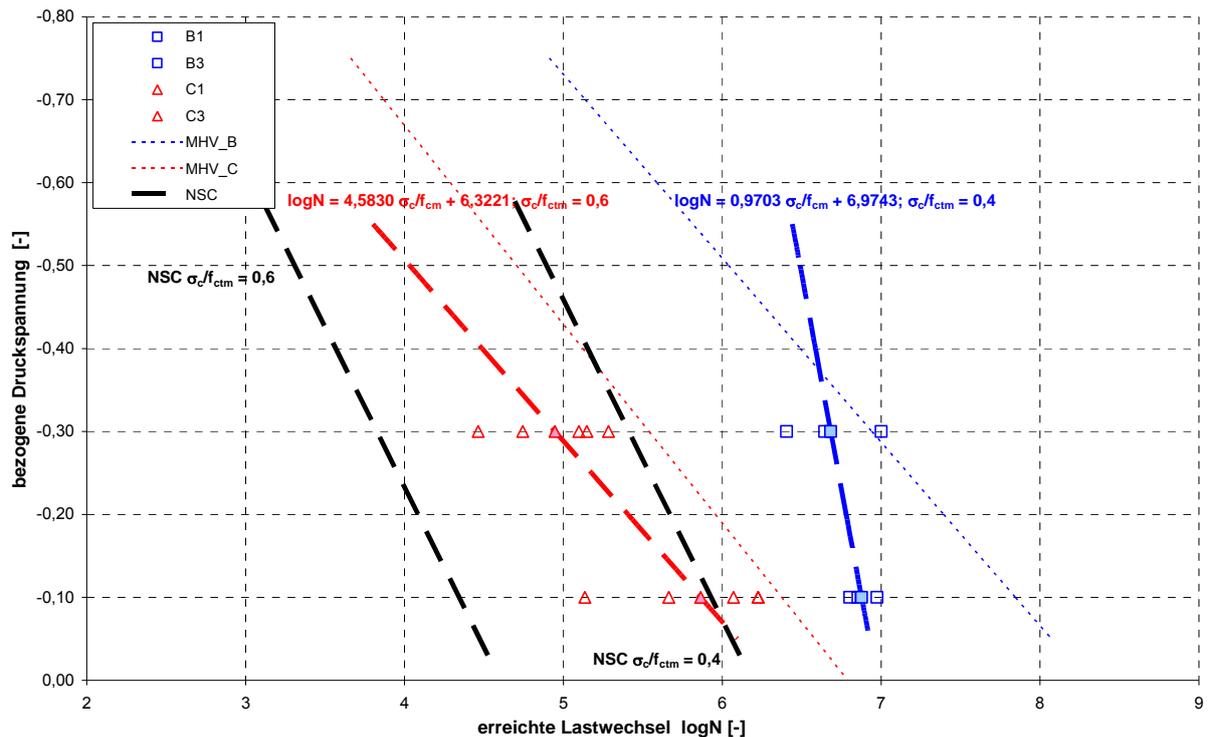


Bild 7.12: Wöhlerlinien des UHPC (M2Q mSF oWB (WB), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)

Die zugehörigen Gleichungen und die Anteilsbereiche der Wöhlerlinien sind im Folgenden aufgeführt:

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$:

$$\log N^{50\%} = 6,9743 - 0,9703 \cdot |\sigma_c/f_{ctm}|; \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,4782 \quad [-] \quad (7.22)$$

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$:

$$\log N^{50\%} = 6,3221 - 4,5830 \cdot |\sigma_c/f_{ctm}|; \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,4591 \quad [-] \quad (7.23)$$

7.1.4.5 Einfluss der Faserorientierung (M2Q mSF mWB, Serie FO)

Um den Einfluss der Faserorientierung auf das Ermüdungsverhalten des UHPC festzustellen, wurden die Prüfkörper der Serie FO stehend betoniert. Durch die unterschiedliche Betonierrichtung wurde ein direkter Zusammenhang zur Faserorientierung vermutet.

Im Bild 7.13 sind die Wöhlerlinien der begleitenden Versuche für die Versuchserie FO (mit Wärmbehandlung und Stahlfasern, stehend betoniert) dargestellt. Zum besseren Vergleich sind zusätzlich zu den Wöhlerlinien aus Normalbeton (schwarz gestrichelt) die beiden Wöhlerlinien der Hauptversuche MHV (punktirt) dargestellt. Die ertragbaren Lastwechsel für die stehend betonierten Prüfkörper liegen bei betragsmäßig höheren Druckunterspannungen nah bei den Lastwechseln der liegend betonierten Prüfkörper. Ein sehr geringer Einfluss der Betonierrichtung scheint für das Ermüdungsverhalten des UHPC vorhanden zu sein. Eine genauere Aussage kann aufgrund der geringen Anzahl der Versuche jedoch nicht getroffen werden.

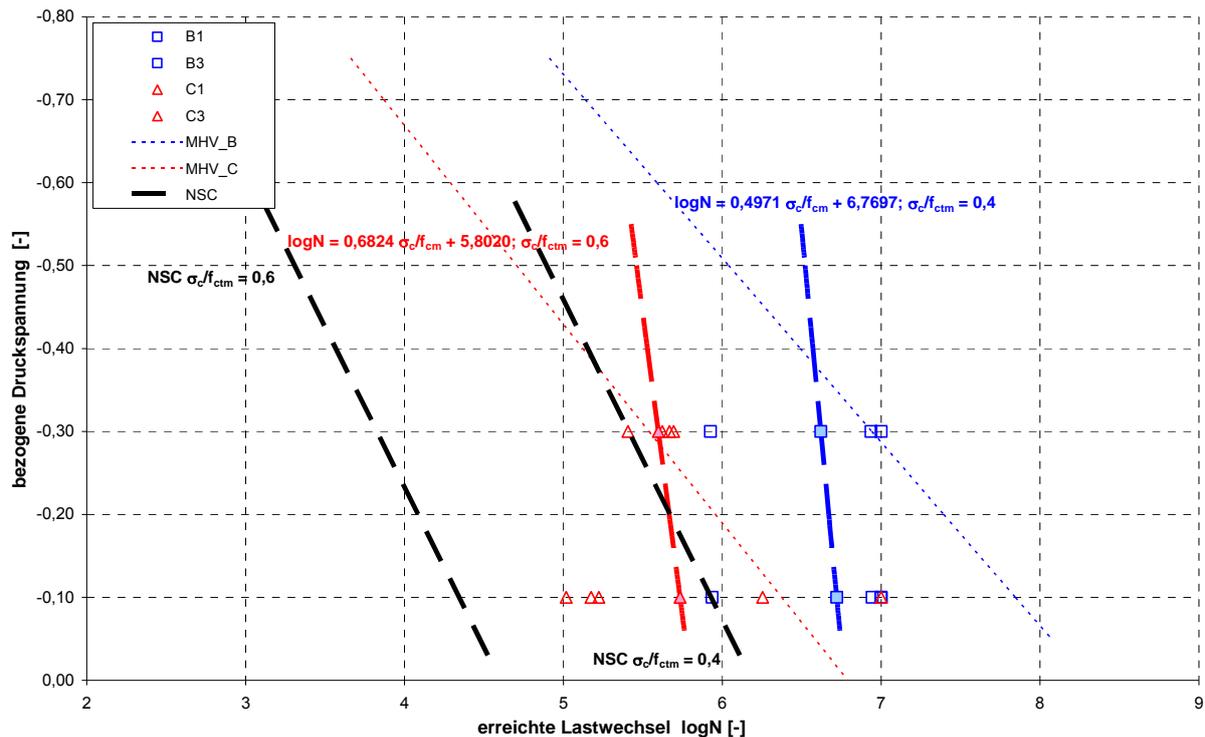


Bild 7.13: Wöhlerlinien des UHPC (M2Q mSF mWB (FO), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)

Die zugehörigen Gleichungen der Wöhlerlinien und ihre Anteilsbereiche sind im Folgenden aufgeführt:

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$:

$$\log N^{50\%} = 6,7697 - 0,4971 \cdot |\sigma_c/f_{ctm}|; \quad \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,3206 \quad [-] \quad (7.24)$$

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$:

$$\log N^{50\%} = 5,8020 - 0,6824 \cdot |\sigma_c/f_{ctm}|; \quad \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,3025 \quad [-] \quad (7.25)$$

In einer Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München wurde für den ultrahochfesten Beton der Einfluss der Betonierichtung auf die Faserorientierung ermittelt. Die Ergebnisse sind in (Schneider 2008) ausführlich beschrieben. Im Folgenden werden Auszüge und die wichtigsten Ergebnisse aus (Schneider 2008) dargestellt.

Ein primäres Ziel der Untersuchungen über die Stahlfaserorientierung war die Auswirkung der Betonierichtung auf die Ausrichtung der Fasern im UHPC. Zu diesem Zweck wurden die stehend betonierten Prüfkörper (Serie FO) und die liegend betonierten Prüfkörper (Serie WB und HV) nach den Ermüdungsversuchen zersägt, aufbereitet, fotografiert und ausgewertet.

Es stellte sich im Rahmen der Bachelorarbeit heraus, dass die Winkelverteilungen der Fasern aller untersuchten Betonquerschnitte eine Normalverteilung besaßen, wobei die Erwartungswerte und Standardabweichungen der untersuchten Probekörper nur in geringem Maße voneinander abwichen. Der Mittelwert der Stahlfaserneigung der liegend betonierten Prüfkörper betrug $\mu = 46,53^\circ$ ($\sigma = 3,53^\circ$), während der Mittelwert der stehend betonierten Prüfkörper $\mu = 45,93^\circ$ ($\sigma = 3,61^\circ$) betrug.

Der erhoffte Effekt, dass sich die Fasern bei stehender Betonage im Durchschnitt paralleler zur Systemachse des knochenförmigen Probekörpers ausrichten würden, konnte bei einer derart geringen Differenz der Erwartungswerte von $0,6^\circ$ nicht bestätigt werden.

Jedoch sind bei genauerer Untersuchung der Verteilung der Fasern über den Querschnitt Unterschiede in den verschiedenen Probekörperserien zu erkennen. So lässt sich nach Betrachtung der Auswertung bei einem Großteil der Probekörper der HV-Serie eine Häufung der Faseranzahl sowie eine Tendenz der „steileren“ (senkrechter zur Schnittfläche) Fasern hin zu einem Querschnittsrand feststellen, während die Faserverteilung bei den stehend betonierten Querschnitten i. Allg. sehr homogen erscheint.

Dieser Effekt resultiert aus vertikalen Entmischungsvorgängen infolge Absetzens, welche in dem aus Betonierichtung gesehenen horizontalen Schnitt stehend betonierten Probekörper nicht zu erkennen sind. Eine eventuelle gegenseitige Beeinflussung der Faserorientierung bedingt durch Stahlfaseranhäufungen über einen Betonquerschnitt konnte nach den Untersuchungen ebenfalls ausgeschlossen werden. So bleibt der durchschnittliche Lagewinkel auch bei einer Verdopplung der Anzahl von Fasern über einen Querschnitt relativ konstant.

7.1.4.6 Einfluss des Luftporengehaltes

Der Einfluss des Luftporengehaltes wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht explizit durch eine gesonderte Versuchsserie untersucht. Jedoch wurde bei jeder Betonage mit Hilfe eines LP-Topfes der Luftporengehalt nach (DIN EN 12350-7:2009-08-00) ermittelt.

Der Luftporengehalt wird als Anteil Luftporen im Zementstein am Gesamtvolumen des fertig verdichteten Betons definiert. Der Luftporengehalt gibt einen Hinweis auf den Verdichtungsgrad. Bei der Prüfung des Luftporengehaltes von Frischbeton mittels Druckausgleichsverfahren wird zwischen einem mit Beton und einem mit Druckluft gefüllten Behälter ein Druckausgleich hergestellt. Der dabei durch die Luftporen des Betons bedingte Druckabfall wird auf einem kalibrierten Manometer als prozentualer Luftporengehalt der Probe abgelesen.

Der Luftporengehalt für die drei UHPC Mischungen betrug im Mittel bei der Mischung M2Q ca. 4,2% ($s_x = 0,67\%$; $v_x = 16,10\%$), bei der Mischung M3Q ca. 5,2% ($s_x = 0,52\%$; $v_x = 9,91\%$) und bei der Mischung B5Q ca. 1,9% ($s_x = 0,33\%$; $v_x = 17,23\%$).

In der Anlage 12.7 sind die Mittelwerte, die Standardabweichung und die Varianz der Ermüdungsversuche und zusätzlich der Luftporengehalt der einzelnen Versuchsserien aufgelistet. Einige Versuche wurden dabei markiert, um darauf hinzuweisen, dass die Standardabweichung und die Varianz einen großen Anteil an Durchläufern erhalten.

Bei der Betrachtung einzelner Serien, kann lediglich bei der Serie M2Q ohne Stahlfasern (OF) auf einen Einfluss des Luftporengehaltes auf die Streuung der ertragbaren Lastwechsel geschlossen werden. Bei allen anderen Ermüdungsversuchen ist keine Steigerung der Streuung bei einem erhöhten Luftporengehalt zu erkennen.

Aus der Gesamtbetrachtung der Auswertung des Luftporengehaltes kann deshalb geschlossen werden, dass der Luftporengehalt keinen Einfluss auf die Streuung der ertragbaren Lastwechsel besitzt. Die Streuung in den erreichten Lastwechsel ist allein auf die Streuung der Zugfestigkeit zurückzuführen.

7.1.4.7 Einfluss der Belastungsfrequenz

Der Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Ermüdungsversuche wurde nicht explizit durch eine gesonderte Versuchsserie untersucht.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde angestrebt, die Versuche bei einer Prüffrequenz von $f = 10$ Hz durchzuführen. Aufgrund der unterschiedlichen Prüfmaschinen und Schwingbreiten konnte dies jedoch nicht immer realisiert werden. Einige Versuche während

der zweiten Förderperiode mit geringen Schwingbreiten und hohen Lastwechselzahlen wurden in einem Hochfrequenzpulsator mit einer Prüffrequenz von $f = 100$ Hz durchgeführt.

Für jede Lastkombination wurde eine bestimmte Prüfmaschine verwendet, so dass bei jeder Lastkombination die Prüffrequenz konstant gehalten wurde. Aus diesem Grund können keine Angaben zum Einfluss der Belastungsfrequenz getroffen werden.

Die Streuungen der erreichten Lastwechsel in den Ermüdungsversuchen sind sicherlich nicht auf die unterschiedliche Belastungsfrequenz zurückzuführen. Aus der Literatur ist lediglich bekannt, dass ein kleiner Einfluss vorhanden sein könnte.

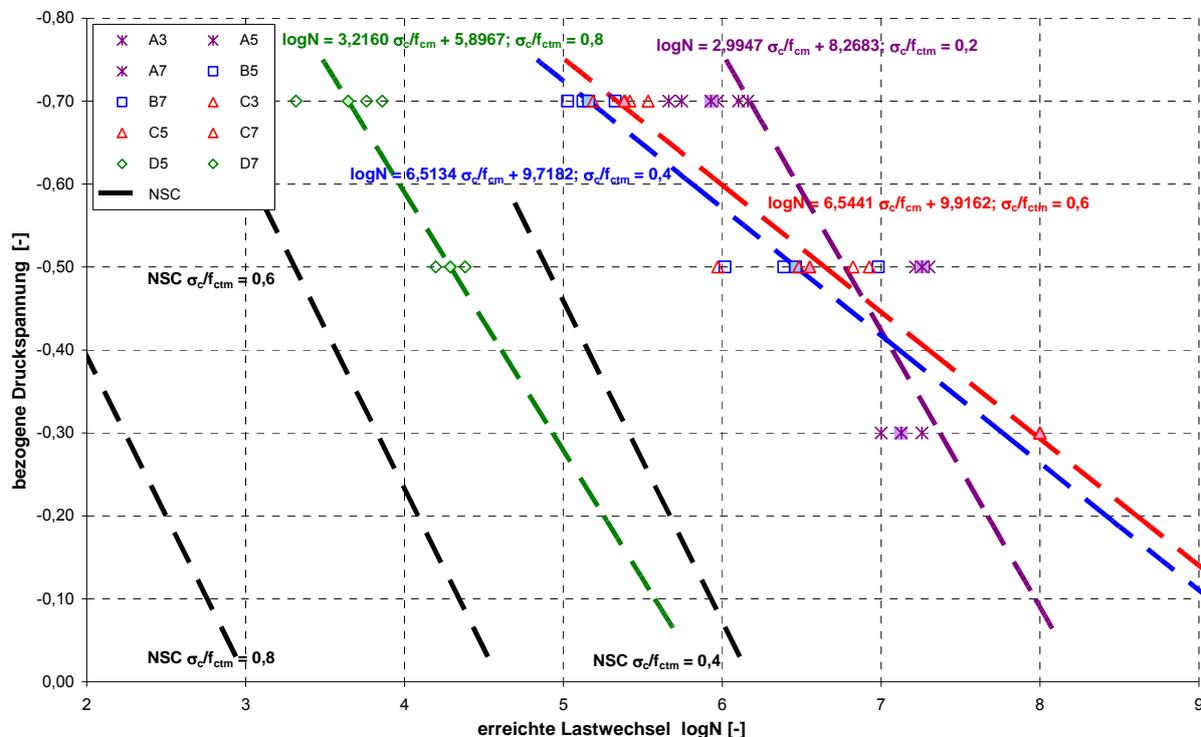
7.1.5 Ermüdungsversuche am grobkörnigen UHPC (B5Q)

7.1.5.1 Hauptversuche B5Q mSF mWB (Serie BHV)

Im Bild 7.14 sind die Ergebnisse der Hauptversuche (BHV) der grobkörnigen UHPC Mischung in Abhängigkeit der erreichten Lastwechselzahlen für unterschiedlich bezogene Oberspannungen σ_c/f_{ctm} dargestellt.

Die Streuungen der Ermüdungsversuche sind deutlich geringer als beim feinkörnigen UHPC. In einem weiteren Schritt müssen die Wöhlerlinien, wie auch beim feinkörnigen UHPC, modifiziert werden, da die nachträgliche Berücksichtigung von Durchläufern und Versuchen mit Druckversagen sinnvoll erscheint.

Bei der grobkörnigen UHPC Mischung wird als erstes bei der Versuchsserie mit einer Ober-spannung von $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$ die Versuche mit Durchläufern bei den bezogenen Druckspannungen von 30% zur Auswertung nicht mit einbezogen, da bereits bei 50% der Druckspannung Durchläufer auftraten. Zum anderen wurden bei der Versuchsserie mit einer Ober-spannung von $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ die Regressionsgerade korrigiert, da diese aus versuchstechnischen Gründen zu geringe Lastwechsel aufwies.



Nach den Modifikationen und der manuellen Korrektur an den Wöhlerlinien ergibt sich ein neues Gesamtbild der Wöhlerlinien, welche in Bild 7.15 dargestellt wird. Zur besseren Übersicht sind die einzelnen Wöhlerlinien in der Anlage 12.5.5 nochmals dargestellt.

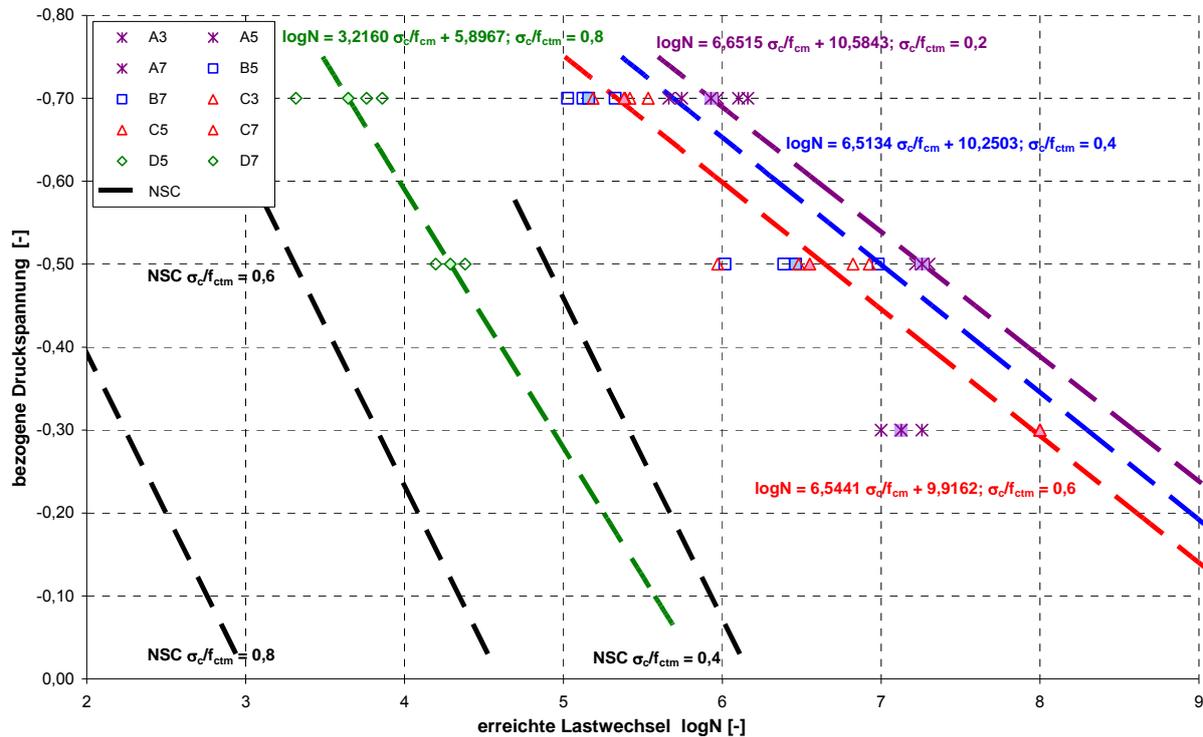


Bild 7.15: Modifizierte Wöhlerlinien des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$)

Wie bereits bei der feinkörnigen UHPC Mischung ist zu erkennen, dass bei geringen Ober-
spannungen die Wöhlerlinien parallel verlaufen. Bei einer hohen Ober-
spannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$ wird ein Abfall der ertragbaren Lastwechsel und eine Änderung in der Neigung der Wöhlerli-
nie deutlich. Der Einfluss der Streuung der Zugfestigkeit spielt auch beim grobkörnigen
UHPC eine deutliche Rolle.

Die zugehörigen Gleichungen und die Anteilsbereiche der modifizierten Wöhlerlinien sind im
Folgenden nochmals kurz aufgeführt:

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$:

$$\log N^{50\%} = 10,5843 - 6,6515 \cdot |\sigma_c/f_{cm}|; \quad \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,2394 \quad [-] \quad (7.26)$$

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$:

$$\log N^{50\%} = 10,2503 - 6,5134 \cdot |\sigma_c/f_{cm}|; \quad \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,5799 \quad [-] \quad (7.27)$$

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$:

$$\log N^{50\%} = 9,9162 - 6,5441 \cdot |\sigma_c/f_{cm}|; \quad \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,3218 \quad [-] \quad (7.28)$$

Oberspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$:

$$\log N^{50\%} = 5,8967 - 3,2160 \cdot |\sigma_c/f_{cm}|; \quad \log N^{95\%,5\%} = \log N \pm 0,6746 \quad [-] \quad (7.29)$$

7.1.5.2 Einfluss der Betonzusammensetzung

Im Bild 7.16 sind die Wöhlerlinien der grobkörnigen UHPC Mischung (gestrichelt) im Vergleich zur feinkörnigen UHPC Mischung (punktiert) aufgetragen. Zusätzlich sind die Wöhlerlinien für den Normalbeton (schwarz gestrichelt) dargestellt.

Ein Einfluss der Betonzusammensetzung ist deutlich erkennbar. Die grobkörnige UHPC Mischung B5Q erreichte in den Ermüdungsversuchen mehr Lastwechsel. Die Faktoren betragen bei den Oberspannungen $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$ und $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ ca. 10 und bei den Oberspannungen $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ und $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$ sogar 100.

Die Gründe hierfür liegen wahrscheinlich in der besseren Mischungszusammensetzung und der besseren Packungsdichte. Die geringere Streuung in der Zugfestigkeit führt zu geringeren Streuungen in den Ermüdungsversuchen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Ermüdungsfestigkeit des grobkörnigen UHPC besser ist als für den feinkörnigen UHPC. Jedoch sollten aufgrund der geringen Anzahl der Versuche weitere Versuche für den grobkörnigen UHPC durchgeführt werden.

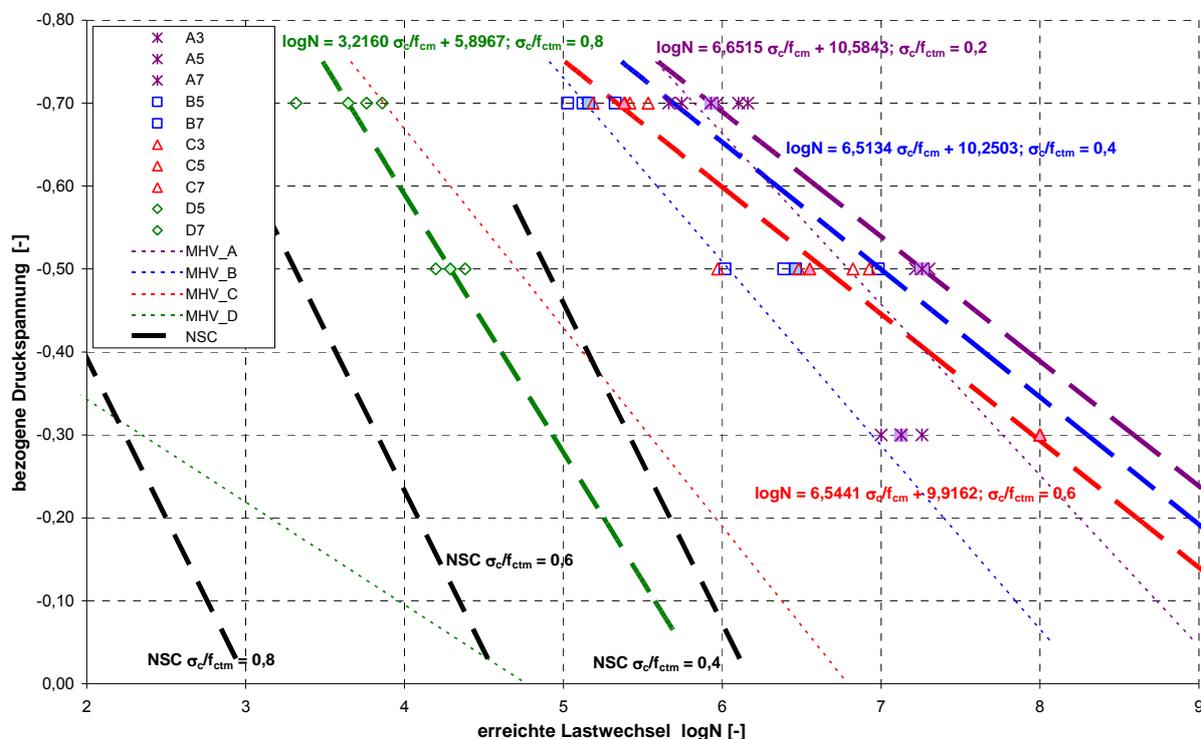


Bild 7.16: Wöhlerlinien des UHPC (Vergleich zwischen M2Q/M3Q und B5Q)

7.2 Dauerfestigkeitsschaubild nach Goodman

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche können auch durch ein Dauerfestigkeitsschaubild, bei dem die Bruchlastspielzahl N als Scharparameter auftritt, dargestellt werden (z.B. Smith-Diagramm oder Goodman-Diagramm). Das am meisten angewandte Smith-Diagramm, in dem Ober- und Unterspannung über der Mittelspannung aufgetragen werden, wird für die Darstellung der Versuchsergebnisse nicht gewählt. Beim Smith-Diagramm müsste die Berechnung der Mittelspannung σ_m aus der Ober- und Unterspannung, welche von zwei unterschiedlichen Festigkeiten (Druck und Zug) abhängen, berechnet werden. Aus diesem Grund erfolgt die Darstellung im Dauerfestigkeitsschaubild nach Goodman. In diesem Diagramm wird für eine bestimmte Bruchlastspielzahl N die bezogene Oberspannung σ_o über die bezogene Unterspannung σ_u aufgetragen.

Ein Goodman-Diagramm für den Normalbeton ist in Bild 7.17 dargestellt. Die Grenzlinien des Wechselbereichs folgen für geringe Druckbeanspruchungen einem in (Cornelissen, Reinhardt 1984) angegebenen Vorschlag, für hohe Druckbeanspruchungen den Ergebnissen nach (DAfStb 1987). Nach (Rings 1986) tritt bereits bei geringen Zugspannungen ein Wechsel der Brucharten vom Druck- zum Zugversagen auf, während gleichzeitig die ertragbaren Lastwechselzahlen signifikant abnehmen.

Es ist anzumerken, dass für zyklisch wechselnd beanspruchten Normalbeton keine schlüssigen Wöhlerlinien existieren, die den gesamten relevanten Bereich erfassen.

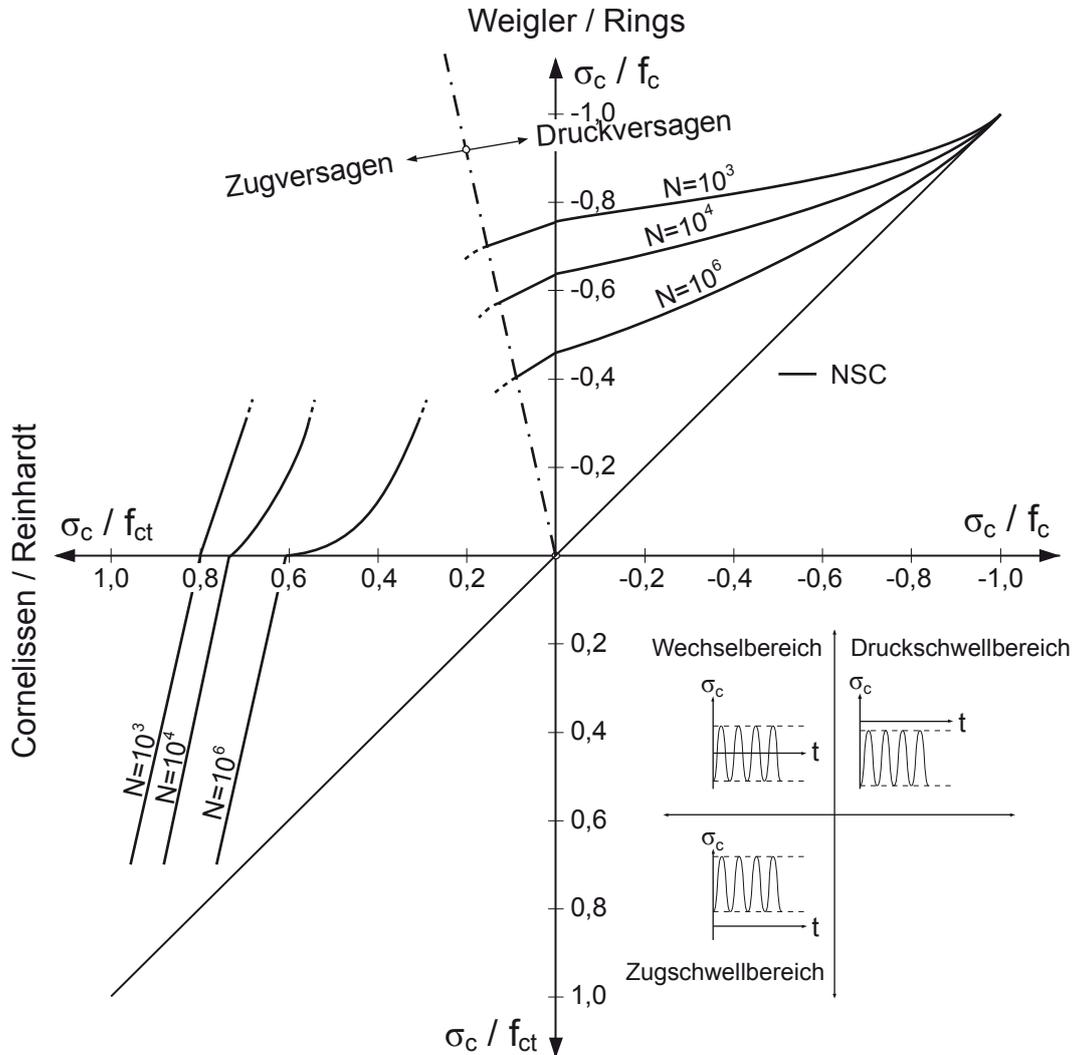


Bild 7.17: Goodman-Diagramm für zyklisch beanspruchten Normalbeton. Ergebnisse für den Normalbeton nach (Cornelissen, Reinhardt 1984) bzw. (DAfStb 1987)

Mit Hilfe der Gleichungen (7.16) bis (7.19) für den feinkörnigen UHPC M2Q bzw. M3Q und den Gleichungen (7.26) bis (7.29) können nun aus den ermittelten Wöhlerlinien die Grenzlinien für den UHPC im Druck-Zug-Wechselbereich berechnet werden.

Für den feinkörnigen UHPC M2Q bzw. M3Q ist das zugehörige Goodman-Diagramm in Bild 7.18 dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Ermüdungsversuche nur im Druck-Zug-Wechselbereich durchgeführt wurden. Die Grenzlinien im 3. Quadranten (Zugschwellbereich) wurden durch Interpolation der Wöhlerlinien berechnet. Für eine genauere Fortführung der Grenzlinien müssten Versuche im Zugschwellbereich durchgeführt werden. Im Bild 7.18 sind die Grenzlinien für Lastwechsel von $N = 10^4$ bis 10^9 als Kurvenscharen dargestellt. Es ist zu

erkennen, dass bei betragsmäßig hohen Unter- und Oberspannungen die ertragbaren Lastwechsel um den Faktor 1000 höher sind als beim Normalbeton. Bei betragsmäßiger Verringerung der Unter- und Oberspannung verkleinert sich der Faktor auf 100. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Wechsel der Versagensarten zwischen Druckversagen und Zugversagen in den Versuchen mit UHPC immer bei Druckunterspannungen $\sigma_c/f_{cm} < -0,6$ auftraten. Bei betragsmäßig geringeren Druckspannungen bzw. bei einer betragsmäßigen Abminderung der Unterspannung wurde ausschließlich ein Zugversagen festgestellt. Im Gegensatz dazu findet der Versagenswechsel beim Normalbeton entlang einer Geraden durch den Ursprung statt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei einer betragsmäßigen Steigerung der Unter- bzw. der Oberspannung in 20% Schritten eine Abminderung der ertragbaren Lastwechsel um den Faktor 10 zu erwarten ist.

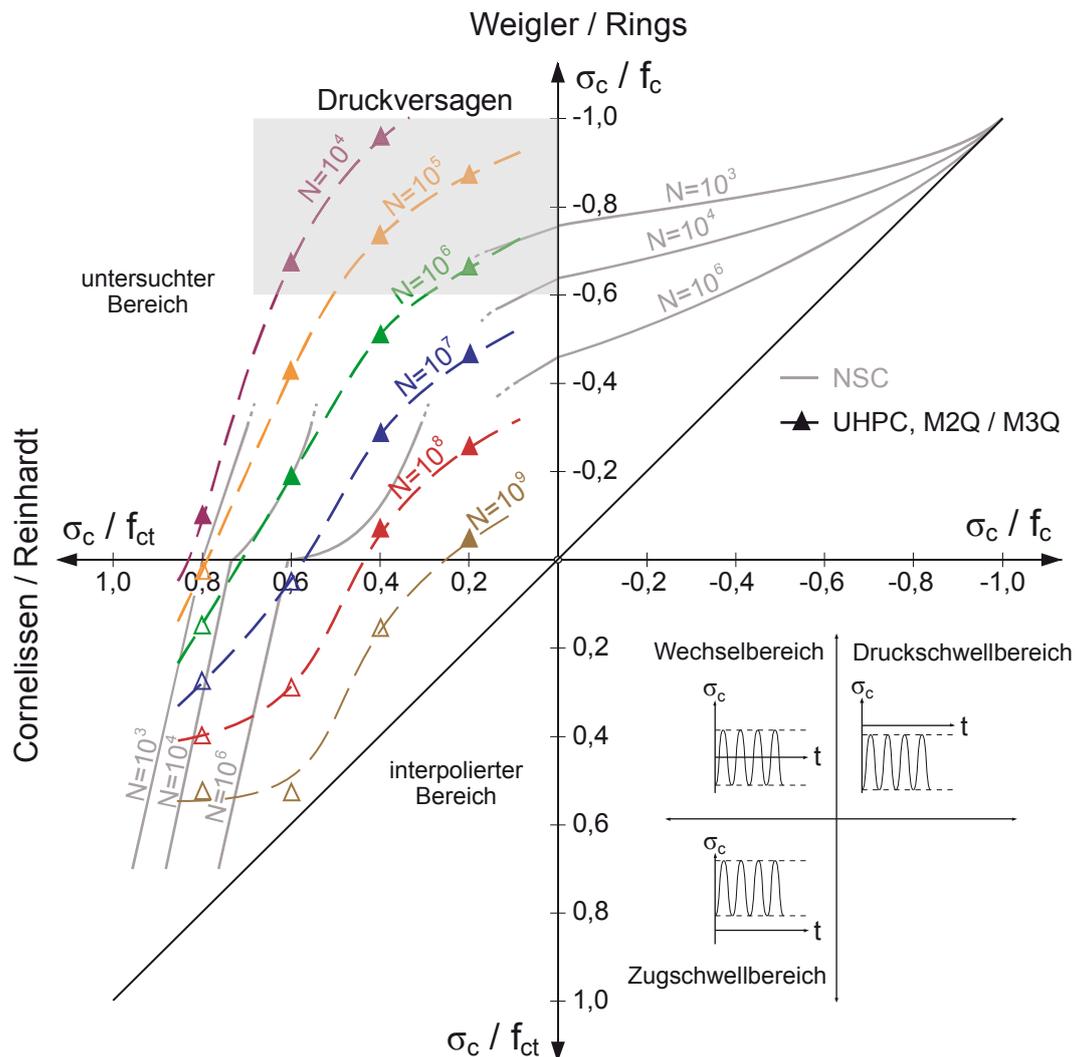


Bild 7.18: Goodman-Diagramm für den feinkörnigen UHPC M2Q bzw. M3Q (Normalbeton nach (Cornelissen, Reinhardt 1984) bzw. (DAfStb 1987))

Für den grobkörnigen UHPC B5Q ist das zugehörige Goodman-Diagramm in Bild 7.19 dargestellt. Wie bereits beim feinkörnigen UHPC wurden auch hier die Ermüdungsversuche nur im Druck-Zug-Wechselbereich durchgeführt. Die Grenzlinien im 3. Quadranten wurden durch Interpolation der Wöhlerlinien berechnet. Für eine genauere Fortführung der Grenzlinien müssten Versuche im 3. Quadranten (Zugschwellbereich) durchgeführt werden. Im Bild 7.19

sind die Grenzlinien für Lastwechsel von $N = 10^4$ bis 10^9 als Kurvenscharen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei allen Unter- und Oberspannungen die ertragbaren Lastwechsel um den Faktor 1000 höher sind als beim Normalbeton. Ebenso ist, wie beim feinkörnigen UHPC, zu erkennen, dass der Wechsel der Versagensarten zwischen Druckversagen und Zugversagen in den Versuchen mit UHPC immer bei Unterspannungen $\sigma_c/f_{ct} < -0,6$ auftraten. Bei betragsmäßig geringeren Druckspannungen bzw. bei einer betragsmäßigen Abminderung der Unterspannung wurde ausschließlich ein Zugversagen festgestellt.

Bei konstanter Unterspannung (Druck) und bei einer kontinuierlichen Erhöhung der Oberspannung (Zug) findet nur ein geringer Abfall der ertragbaren Lastwechsel statt. Erst bei einer Erhöhung der Oberspannung von $\sigma_c/f_{ctm} > 0,6$ findet ein drastischer Abfall der Grenzlinien statt. Diese Tendenz müsste jedoch durch weitere Versuche bestätigt werden. Des Weiteren ist anzumerken, dass der Abfall der Grenzlinien bei Erhöhung der Oberspannung (Zug) bei konstanter Unterspannung beim feinkörnigen UHPC viel schneller erfolgt.

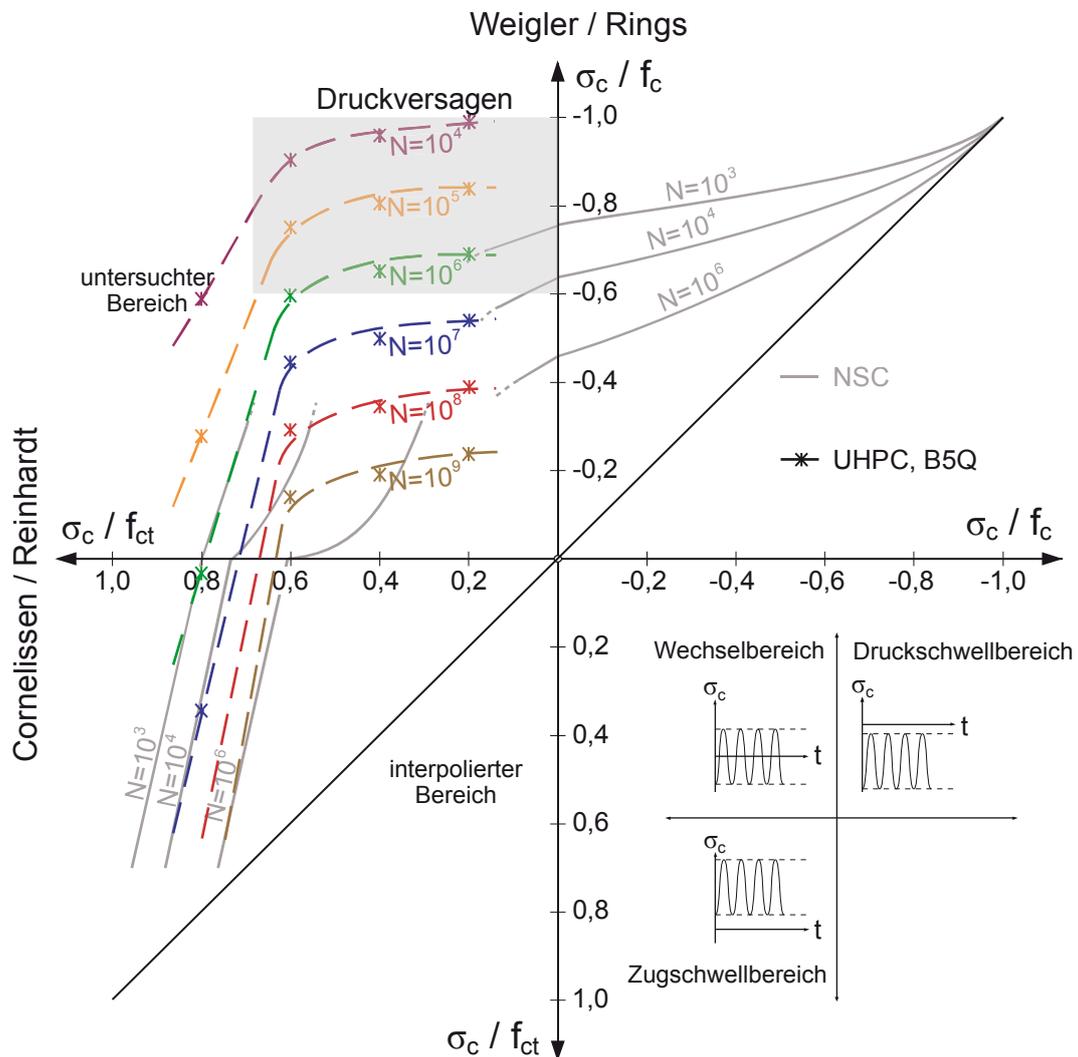


Bild 7.19: Goodman-Diagramm für den feinkörnigen UHPC M2Q bzw. M3Q (Normalbeton nach (Cornelissen, Reinhardt 1984) bzw. (DAfStb 1987))

7.3 Versagensmodell bei Wechselbelastung

Zur Betrachtung der Rissentstehung und -entwicklung bei der Ermüdung des Betons ist eine Aufteilung in drei Ebenen nach (Wittmann 1983) und (Hohberg 2004) vorteilhaft:

- 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 Rissentstehung, der Rissfortschritt sowie die notwendige Energie zu deren Entwicklung spielen für den Beton eine wichtige Rolle. Bisherige Ergebnisse von Ermüdungsversuchen an Normalbeton lassen, aufgrund erheblicher Streuung, keine gesicherte Aussage zu (Hohberg 2004).

Die erwähnten Betrachtungsebenen beeinflussen maßgeblich die Analyse der Rissentwicklung und des Rissfortschrittes. Auf der Meso-Ebene werden Mechanismen wie Rissverzweigung, Rissuferüberbrückung und Rissuferverzahnung relevant. Auf der Makroebene kann ein Bruchverlauf lediglich durch die möglichst auf der feineren Betrachtungsebene hergeleiteten bruchmechanischen Stoffgesetze beschrieben werden.

Normalbeton weist aufgrund der Hydratation- und Schwindvorgänge bereits vor einer äußeren Erstbelastung feine Mikrorisse, vorwiegend in der Kontaktzone zwischen den Zuschlagkörnern und der umgebenden Zementsteinmatrix, auf (Kessler-Kramer 2002). Dieselben Effekte sind beim UHPC zu beobachten.

Für die maßgebenden strukturellen Mechanismen des Betonversagens unter Ermüdungsbeanspruchung gibt es im Wesentlichen zwei Hypothesen bezüglich der Rissentwicklung im Normalbeton unter zyklischer Beanspruchung. Die erste Hypothese beschreibt die fortschreitende Auflösung des Verbundes zwischen den größeren Zuschlagkörnern und der Mörtelmatrix als Ursache für das Ermüdungsversagen. Die zweite Hypothese besagt, dass das Ermüdungsversagen von Normalbeton durch das Wachstum der bereits vor der Belastung existierenden Mikrorisse in der Matrix verursacht wird. Mit zunehmender Verformung wachsen die Mikrorisse zusammen und bilden einen Makroriss, wodurch der beanspruchte Querschnitt geschwächt wird, so dass die aufgebrachte Last schließlich nicht mehr aufgenommen werden kann. Es ist wahrscheinlich, dass beide genannten Mechanismen im ermüdungsbeanspruchten Normalbeton auftreten und sich überlagern (Kessler-Kramer 2002).

Aufbauend auf der Arbeit von (Lusche 1971) wird in (Rings 1986) ein Modell für die Spannungsverteilung bei Wechselbelastung von Normalbeton unter Berücksichtigung einer fortgeschrittenen Mikrorissbildung vorgeschlagen, welches in Bild 7.20 dargestellt ist.

Bei einer häufig wiederholten Belastung ist die Spannungsverteilung aufgrund einer fortschreitenden Mikrorissbildung von der Lastspielzahl abhängig. Für den späteren Bruch ist der Zustand mit ausgeprägter Mikrorissbildung bzw. der charakteristische Zustand des Gefüges maßgebend (Rings 1986).

Bei den UHPC Ermüdungsversuchen sind bei der Wechselbelastung zwei Versagensarten beobachtet worden. Die Versuche mit betragsmäßig hoher Unterspannung $\sigma_c/f_{cm} < -0,6$ versagten alle auf Druck, während die restlichen Versuche (Durchläufer ausgeschlossen) auf Zug versagten. Des Weiteren wurde beobachtet, dass die Streuung der Ermüdungsversuche auf die Streuung der Zugfestigkeit zurückzuführen ist.

Die Zugspannungen im UHPC sind bei äußerer Druckbelastung senkrecht zur Krafrichtung und bei äußerer Zugbelastung parallel zur Krafrichtung orientiert.

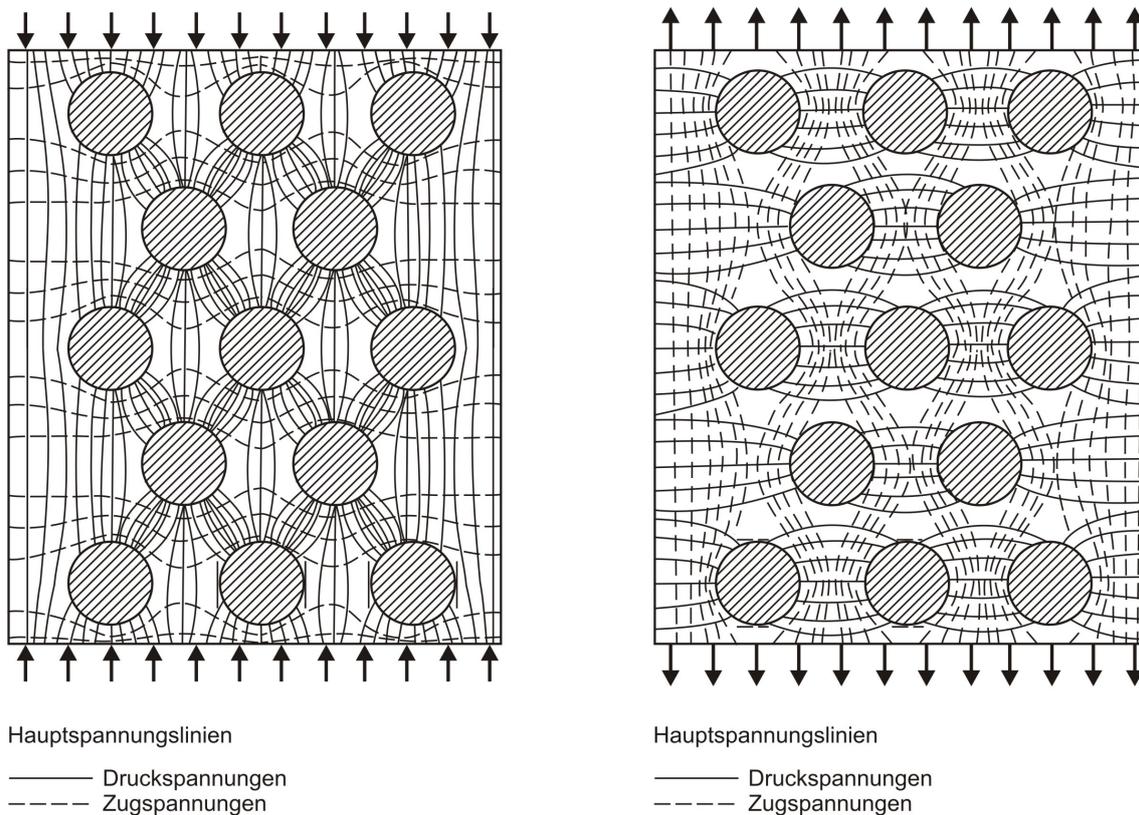


Bild 7.20: Spannungsverteilung bei Wechselbelastung von Normalbeton unter Berücksichtigung einer fortgeschrittenen Mikrorissbildung (aus Rings 1986)

Während beim Normalbeton Mikrorisse als Haft- und Matrixrisse an den Zuschlagskörnern auftreten, sind beim UHPC aufgrund fehlender großer Zuschlagskörner und hochfester Matrix Risse durch die feinen Zuschlagskörner zu erwarten. Beim grobkörnigen UHPC B5Q konnte z.B. festgestellt werden, dass nach dem Bruch die Zuschlagskörner (Basalt 2/8) vollständig durchtrennt waren. Dasselbe Phänomen wird auch beim Leichtbeton festgestellt, wo die Zuschläge mit geringer Rohdichte die Schwachstelle bilden.

Bei einer Druckbeanspruchung treten die Mikrorisse parallel zur Krafrichtung auf. Im Gegensatz dazu kehren sich bei einer Zugbeanspruchung die Vorzeichen der Spannungen um. Die Mikrorissbildung erfolgt demnach an der Ober- und Unterseite der Zuschlagskörner, d.h. senkrecht zur Krafrichtung (Bild 7.20).

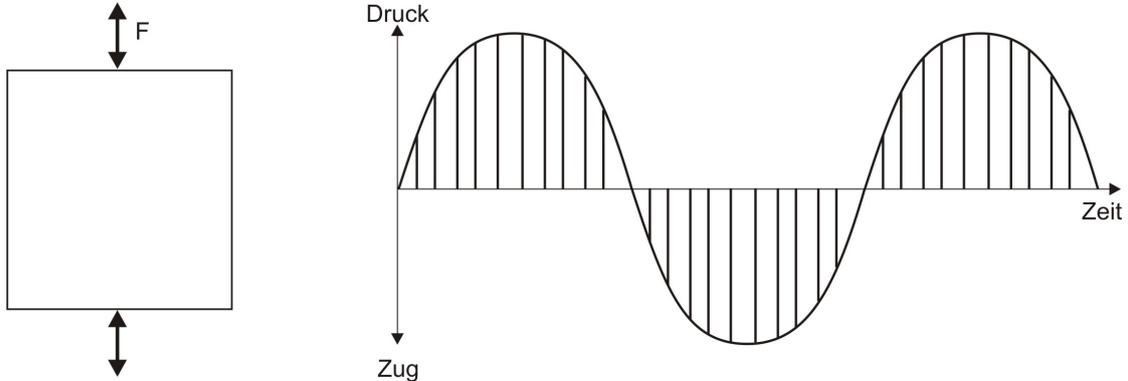
In (Rings 1986) wird zum Ermüdungsversagen des Normalbetons folgende These aufgestellt:

„Die Zugspannungen bei Druck- und Zugbelastung verlaufen nicht nur in unterschiedlichen Richtungen, sondern treten überwiegend auch in unterschiedlichen Bereichen des Betongefüges auf, d.h. es liegen Bereiche mit Zugspannungen senkrecht zur Krafrichtung sowie Bereiche mit Zugspannungen in Krafrichtung vor. Für jeden dieser Bereiche wird die Ermüdungsfestigkeit durch Wöhlerlinien beschrieben. Die Bruchlastspielzahl des Betons sowie die Versagensart wird durch die kleinste Bruchlastspielzahl ergebende Wöhlerlinie bestimmt.“

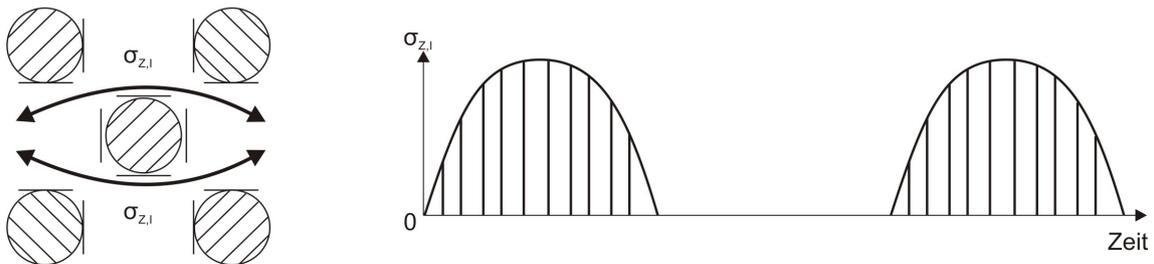
Die äußere Wechselbelastung kann also in zwei Schwellbeanspruchungen aufgeteilt werden, welche durch die Grenzen $\sigma_o/f_{ctm} = 0$ und σ_o/f_{ctm} (Druck) bzw. σ_o/f_{ctm} (Zug) definiert sind, Durch die jeweilige Schwellbeanspruchung entstehen unterschiedliche Zugbeanspruchungen in der

Matrix (Bild 7.21). Dabei werden die Spannungszustände in zwei Bereiche aufgeteilt. Der Bereich I entsteht bei einer Druckbeanspruchung und den dazugehörigen Zugspannungen senkrecht zur Krafrichtung. Bei einer Zugbeanspruchung und den Zugspannungen parallel zur Krafrichtung wird vom Bereich II gesprochen.

Äußere Belastung



Zugbeanspruchung der Matrix (Bereich I)



Zugbeanspruchung der Matrix (Bereich II)

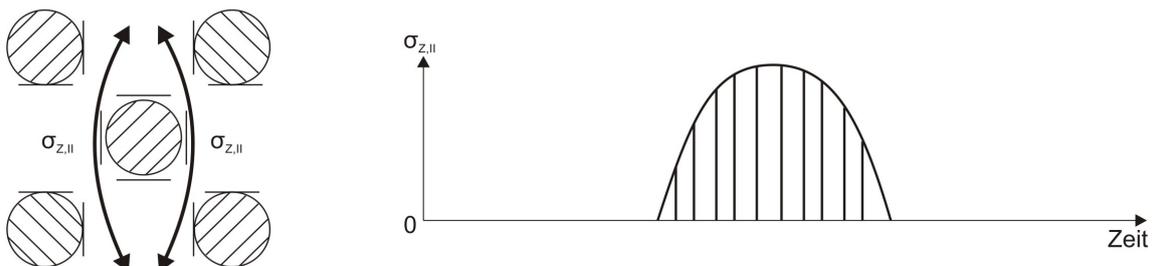


Bild 7.21: Zugbeanspruchung der Matrix bei äußerer Zug- und Druckbelastung (aus Rings 1986)

Bei beiden Bereichen treten Zugspannungen auf, welche aber nicht zwangsläufig gleich groß sein müssen. In einem weiteren Schritt werden bei (Rings 1986) Wöhlerlinien aus bisherigen Druckschwell- und Zugschwellversuchen miteinander verglichen. Dabei werden mögliche Zusatzbeanspruchungen, welche bei Wechselbelastungen durch die Zugkomponente entstehen außer Acht gelassen.

Aus diesen qualitativen Überlegungen entstehen Wöhlerlinien für Druckschwell- und Zugschwellbelastungen, welche in Bild 7.22 dargestellt sind. Bei einer Annahme, dass die äußere Druckbelastung keinen Einfluss auf die Wöhlerlinie besitzt entsteht eine Wöhlerlinie parallel zur Ordinate. Maßgebend ist die Wöhlerlinie, die den kleinsten Wert für N ergibt. Mit stei-

gender Oberspannung σ_o ist mit einer geringeren Bruchlastspielzahl zu rechnen, da sowohl bei einer äußeren Druckbeanspruchung als auch bei einer Zugbeanspruchung eine zunehmende Mikrorissbildung zu erwarten ist.

Ein Vergleich mit den Versuchsergebnissen aus (Wefer 2010) zeigt, dass die reinen Druckschwellversuche ähnlich wie im Bild 7.22 flacher verlaufen, als die eigenen Versuche im Druck-Zug-Wechselbereich.

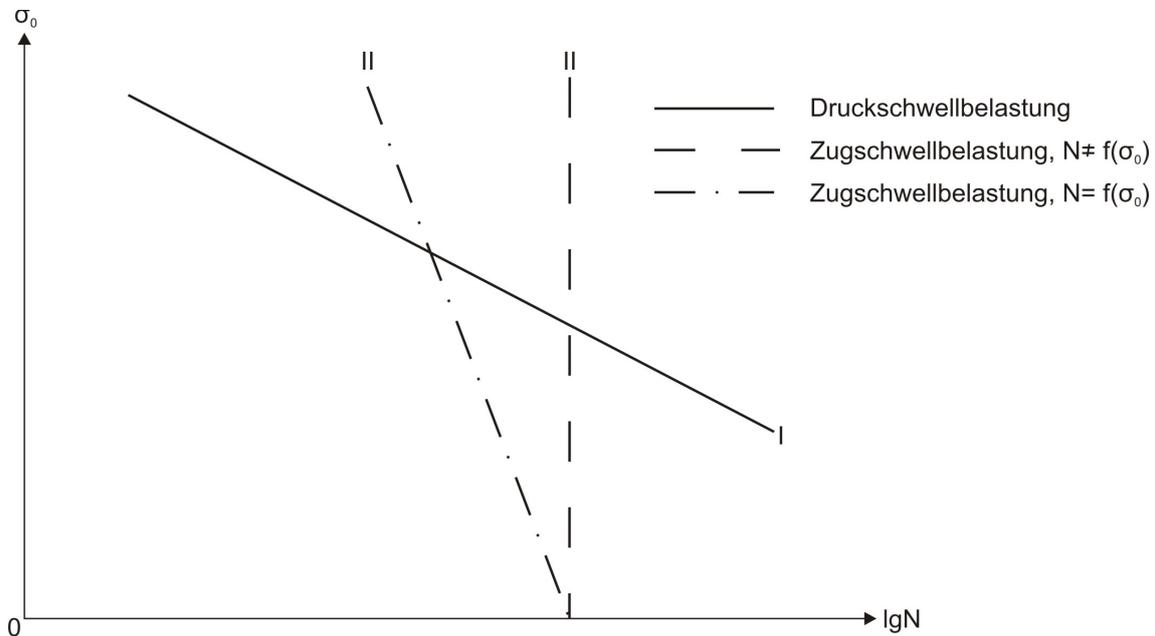


Bild 7.22: Wöhlerlinien für Druckschwell- und Zugschwellbelastung (aus Rings 1986)

Der Schnittpunkt der Wöhlerlinien I und II im Bild 7.22 beschreibt den Wechsel der für das Versagen maßgebenden Zugspannungsbereiches, d.h. den Umschlag von Bereich I nach II oder umgekehrt und damit auch den Wechsel der Versagensart (Rings 1986).

Zusammenfassend kann für den UHPC gefolgert werden, dass aus einer geringeren Zugbeanspruchung eine größere Ermüdungsfestigkeit bzw. Bruchlastspielzahl folgt. Bei Druckschwellversuchen ist die Wöhlerlinie flacher geneigt. Sowohl bei den Druckschwellversuchen als auch bei den Versuchen im Wechselbereich ist die Mikrorissbildung infolge der örtlichen Zugbeanspruchung für das Versagen des Prüfkörpers verantwortlich. Ab einem gewissen Punkt (beim UHPC $\sigma_o/f_{cm} < -0,6$) ist ein Wechsel der Versagensart von Zugversagen zum Druckversagen zu beobachten.

7.4 Bruchbild bei Ermüdungsversuchen unter Zugschwell- und Druck-Zug-Wechselbelastung

Es wurden zwei Arten von Versagen während den Versuchen festgestellt, welche im Folgenden kurz anhand der Bruchbilder dargestellt werden.

Bei den Versuchen mit Druckversagen wurden die Prüfkörper durch einen Diagonalriss „gesprengt“ (Bild 7.23).

Sowohl für den feinkörnigen UHPC M2Q/M3Q als auch für den grobkörnigen UHPC B5Q sah dabei das Bruchbild gleich aus. Dieselbe Bruchart wird auch in (Rings 1986) für ein Druckversagen dokumentiert. Auffällig war, dass kurz vor dem Bruch ein Anstieg der Oberflächentemperatur von ca. 10 K beobachtet wurde. Die Maximaltemperatur an der Prüfkörperoberfläche betrug dabei ca. 40°C. Dies wurde nur bei den Prüfkörpern mit Druckversagen und nur kurz vor dem Bruch beobachtet.

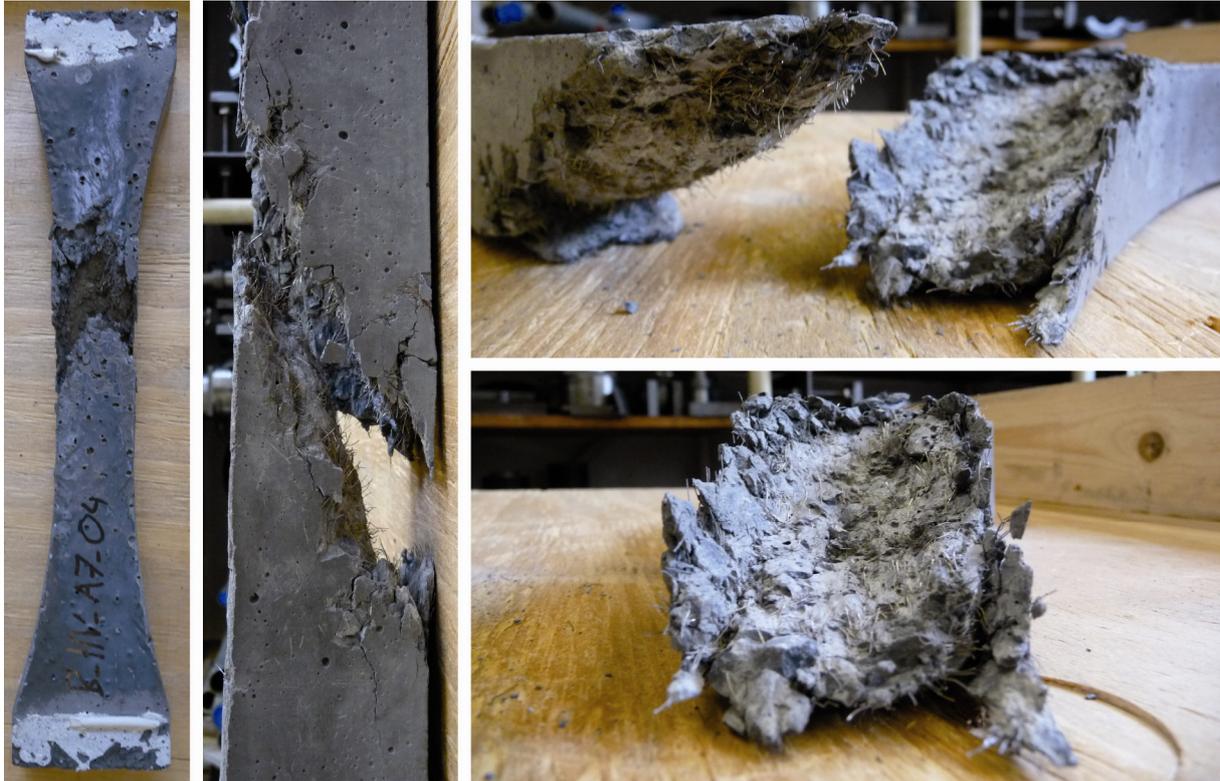


Bild 7.23: Druckversagen eines Prüfkörpers (BHV_A7_04, N = 932.062)

Bei den Versuchen mit Zugversagen erfolgte der Bruch ohne Vorankündigung und schlagartig bzw. ohne vorherige sichtbare Rissbildung. Bei allen Prüfkörpern mit Zugversagen wurde ein nahezu senkrecht zur Kraftachse verlaufender Trennbruch beobachtet (Bild 7.24).

Des Weiteren fiel auf, dass bei allen Prüfkörpern mit Zugversagen ein Herausziehen der Stahlfasern erfolgte. Dabei spielte die Häufigkeit und die Anordnung der Stahlfasern keinerlei Rolle. Es kann anhand der Bruchbilder keine Folgerung auf den Beginn bzw. den Start des Trennrisses erfolgen.

Im Bild 7.25 ist zum Vergleich das Bruchbild eines grobkörnigen UHPC Prüfkörpers abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, dass beim grobkörnigen UHPC (B5Q) ebenso die Stahlfasern herausgezogen wurden. Außerdem ist zu erkennen, dass die Basalt Zuschlagskörner durchtrennt worden sind.



Bild 7.24: Zugversagen eines Prüfkörpers (MHV_D0_02, N = 44.886)



Bild 7.25: Zugversagen eines Prüfkörpers (BHV)

7.5 Verformungsverhalten und Schädigungsverlauf

7.5.1 Allgemeines

Im Abschnitt 2.3.2 und 7.3 wurden bereits die Versagensmechanismen für den Normalbeton beschrieben.

Die fortschreitende Zerstörung des Verbundes zwischen den Zuschlagskörnern und der Matrix, das fortschreitende Wachstum der bereits im unbelasteten Beton vorhandenen Defekte und Mikrorisse und die Vereinigung der Mikrorisse zu makroskopisch sichtbaren Risse sind die wesentlichen Mechanismen, die zu einem Ermüdungsversagen von Normalbeton führen. Die Schädigungsmechanismen treten dabei unabhängig vom Belastungstyp (Zugschwell-, Druckschwell- oder Wechselbeanspruchung) auf.

Bei Betrachtung auf Makro-Ebene tritt ein Ermüdungsversagen bei Druckschwellbeanspruchungen und Wechselbeanspruchungen mit geringen Zugunterlasten nach fortschreitender Gefügeflockung als vollständige Zerstörung des Betongefüges auf (Druckversagen) - das Gefüge „zerfällt“. Im Unterschied hierzu führt das Mikrorisswachstum bei Zugschwell- oder Wechselbeanspruchung mit überwiegender Zugspannung zu einer Trennrissbildung weit unterhalb der statischen Zugfestigkeit (Zugversagen).

Das fortschreitende Mikrorisswachstum bzw. die Gefügeflockung kann auf Makro-Ebene unabhängig vom Beanspruchungsbereich in Analogie zu den klassischen Modellen der Bruchmechanik in drei charakteristische Phasen eingeteilt werden - Rissentstehung (Phase I), stabiler Rissfortschritt (Phase II) und instabiles bzw. progressives Risswachstum (Phase III). Bei Normalbeton umfasst die erste Phase etwa 20% der Lebensdauer. Der Übergang von der zweiten zur dritten Phase erfolgt bei etwa 80% der Lebensdauer (Rings 1986). Für den hochfesten Beton wird der Übergang zwischen der Phase I und II bei etwa 10% der Lebensdauer und der Übergang zwischen Phase II und III bei etwa 90% der Lebensdauer festgelegt (König et al. 2006). Eine qualitative Beschreibung des Schädigungsverlaufs von Normalbeton (NSC) und hochfestem Beton (HSC) ist im Bild 7.26 dargestellt. Zusätzlich zu den verkürzten Phasen I und III ist zu erkennen, dass der hochfeste Beton höhere Verformungen als der Normalbeton aufweist.

Die qualitative Beschreibung der Schädigungsverläufe von NSC und HSC kann aufgrund erster Ergebnisse um den Schädigungsverlauf des ultrahochfesten Betons (UHPC) erweitert werden. Es ist zu erwarten, dass die Phasen I und III gegenüber dem hochfesten Beton kürzer sind.

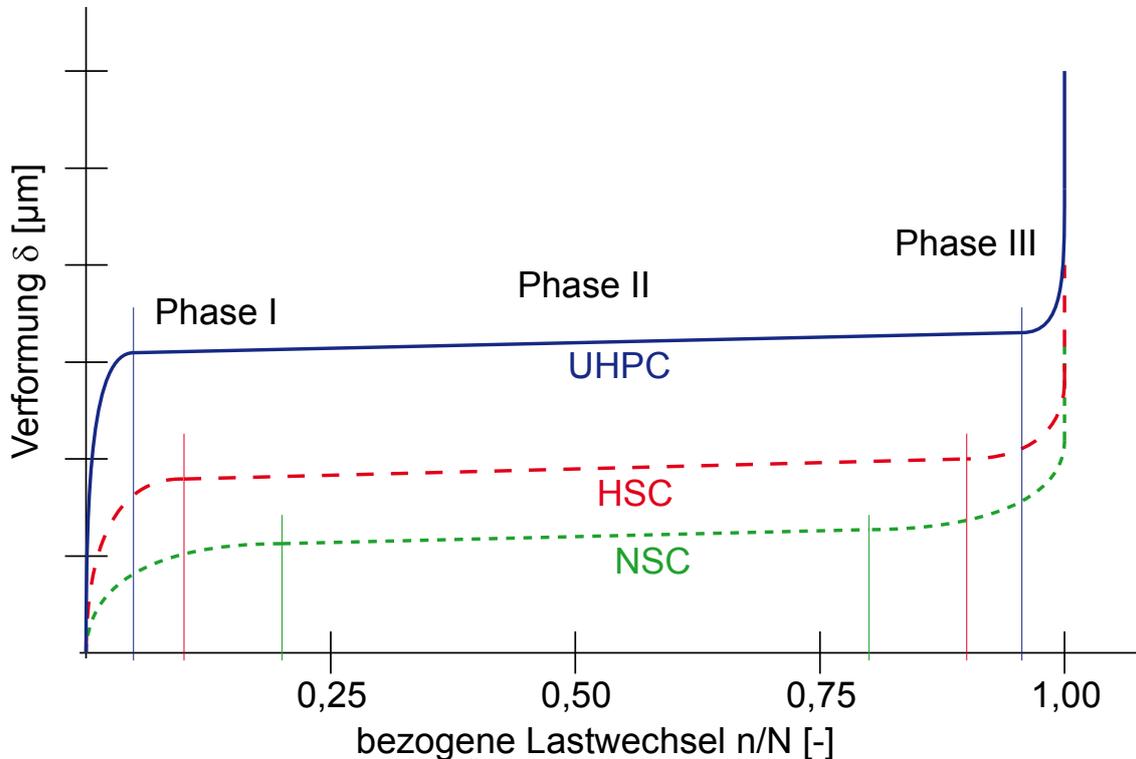


Bild 7.26: Qualitative Beschreibung des Schädigungsverlaufs von Normalbeton (NSC), hochfestem Beton (HSC) und ultrahochfestem Beton (UHPC)

Bei genauerem Betrachten der Schädigungsverläufe fällt auf, dass die Kurven einer Gleichung m -ter Ordnung mit ungerader Potenz ähneln. Es wird folgende Gleichung m -ter Ordnung angenommen:

$$y = a^m \cdot (x + b)^m + c \cdot (x + d)^n + e \quad [-] \quad (7.30)$$

Im weiteren Schritt wird die Gleichung etwas vereinfacht, in dem die Potenz des zweiten Terms $n = 1$ und der Beiwert $d = 0$ gesetzt wird. Die vereinfachte Gleichung für die Dehnung ε in Abhängigkeit der bezogenen Lastwechsel n/N lautet wie folgt:

$$\varepsilon = a^m \cdot (n/N + b)^m + c \cdot (n/N) + e \quad [\%] \quad (7.31)$$

Der Beiwert b ist dabei aus mathematischen Gründen $b = -0,5$ und darf nicht verändert werden. Durch geschickte Wahl der Beiwerte a , m , c und e kann nun nahezu jeder Schädigungsverlauf abgebildet werden. Dabei sind folgende Bedingungen einzuhalten:

- Der Beiwert a bestimmt die Höhe der Dehnung am ersten Wendepunkt.
- Die Potenz m ist als ungerade, positive und ganze Zahl beliebig wählbar. Dabei gilt je größer die Potenz, umso kürzer sind die Phasen I und III.

- Der Beiwert c bestimmt die Steigung der Geraden in der Phase II des Schädigungsverlaufs.
- Der Beiwert e verschiebt den Schädigungsverlauf durch den Ursprung.

Mit Hilfe der bisherigen Versuche für Normalbeton (Rings 1986) und hochfestem Beton (König et al. 2006) werden folgende Gleichungen für den Schädigungsverlauf von NSC und HSC vorgeschlagen:

Normalbeton:

$$\varepsilon = 2,00^9 \cdot (n/N - 0,50)^9 + 1,25 \cdot (n/N) + 1,00 \quad [\%] \quad (7.32)$$

Hochfester Beton:

$$\varepsilon = 2,07^{15} \cdot (n/N - 0,50)^{15} + 0,75 \cdot (n/N) + 1,68 \quad [\%] \quad (7.33)$$

Das Ergebnis der beiden Gleichungen ist im Bild 7.27 dargestellt. Mit Hilfe dieser beiden Gleichungen und den Ergebnissen aus den Ermüdungsversuchen soll im Folgenden ein vernünftiger Ansatz für den Schädigungsverlauf des UHPC gefunden werden.

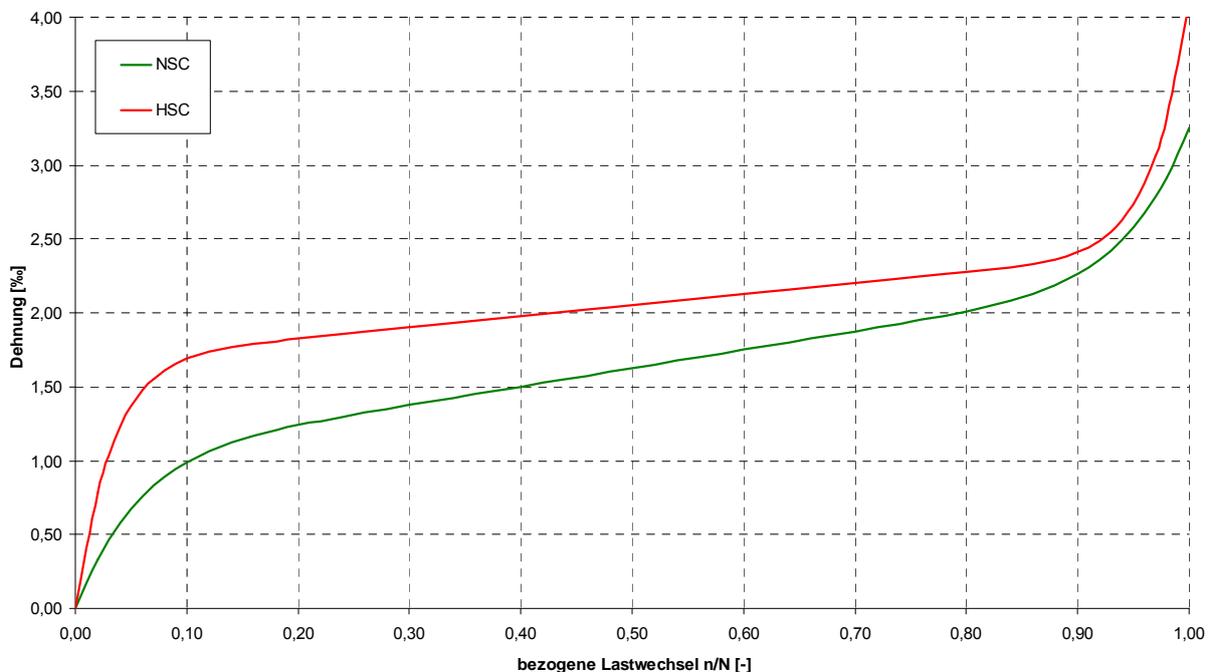


Bild 7.27: Schädigungsverlauf von Normalbeton (NSC) und hochfestem Beton (HSC)

7.5.2 Schädigungsverlauf des feinkörnigen UHPC (M2Q/M3Q)

Mit Hilfe der Messungen, die während der Ermüdungsversuche durchgeführt worden sind, konnten bei einigen Versuchen die Dehnungen während der Versuche aufgezeichnet werden (s. Abschnitt 6). Dabei wurde mit Hilfe von vier Wegaufnehmern auf einer Länge von 50 bzw. 100 mm die Längenänderung gemessen. Diese Messmethode hat den Nachteil, dass nur über eine begrenzte Länge der Prüfkörper die Verformung gemessen wird. Dies bedeutet bei Versuchen, die außerhalb der Wegaufnehmer versagen ist der Schädigungsverlauf nicht vernünftig darstellbar.

Zusätzlich zu den Messungen mit den vier Wegaufnehmern wurden standardmäßig die aufgebrachte Kraft und die Verformung in Krafrichtung über den Kolbenweg gemessen. Bei der

Messung der Verformung in Krafrichtung über den Kolbenweg ist die Verformung der Prüfeinrichtung bzw. des Prüfrahmens zu berücksichtigen. Im Vergleich zur Verformung der Prüfkörper sind diese aber gering, so dass sie in dieser Arbeit vernachlässigt werden.

Die im Folgenden dargestellten und gemessenen Schädigungsverläufe werden mit Hilfe des Kolbenwegs berechnet. Dabei werden zur Berechnung der Dehnungen die Höhe der Prüfkörper und der Auflagerplatten berücksichtigt.

Bei der feinkörnigen Mischung M2Q bzw. M3Q sind aus versuchstechnischen Gründen nur einige wenige Versuchsergebnisse verwendbar. Sie liefern dafür eine gute Basis um erste Ansätze für den Schädigungsverlauf zu definieren. Die Ergebnisse der Schädigungsverläufe sind in der Anlage 12.8.1 dargestellt. Zum besseren Verständnis sind im Bild 7.28 die Schädigungsverläufe der Serie A7 ($\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$ und $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$) dargestellt. Dabei wird die gesamte Dehnungsdifferenz (aus Ober- und Unterspannung) gegen die bezogenen Lastwechsel dargestellt. Aus der Serie A7 stehen vier Messungen zur Verfügung. Zu jedem Versuch sind zusätzlich die erreichten Lastwechsel dargestellt. Die drei Phasen des Rissfortschrittes bzw. des Schädigungsverlaufs sind deutlich erkennbar. Des Weiteren fällt auf, dass die Phasen I und III, im Vergleich zum Normalbeton und hochfesten Beton im Bild 7.27, sehr stark verkürzt sind. Mit Hilfe des oben beschriebenen Ansatzes kann nun für die Serie A7 eine optische Annahme für den Schädigungsverlauf getroffen werden. Die Gleichung der getroffenen Annahme und der zugehörige Schädigungsverlauf (schwarz gestrichelt) sind ebenfalls im Bild 7.28 dargestellt.

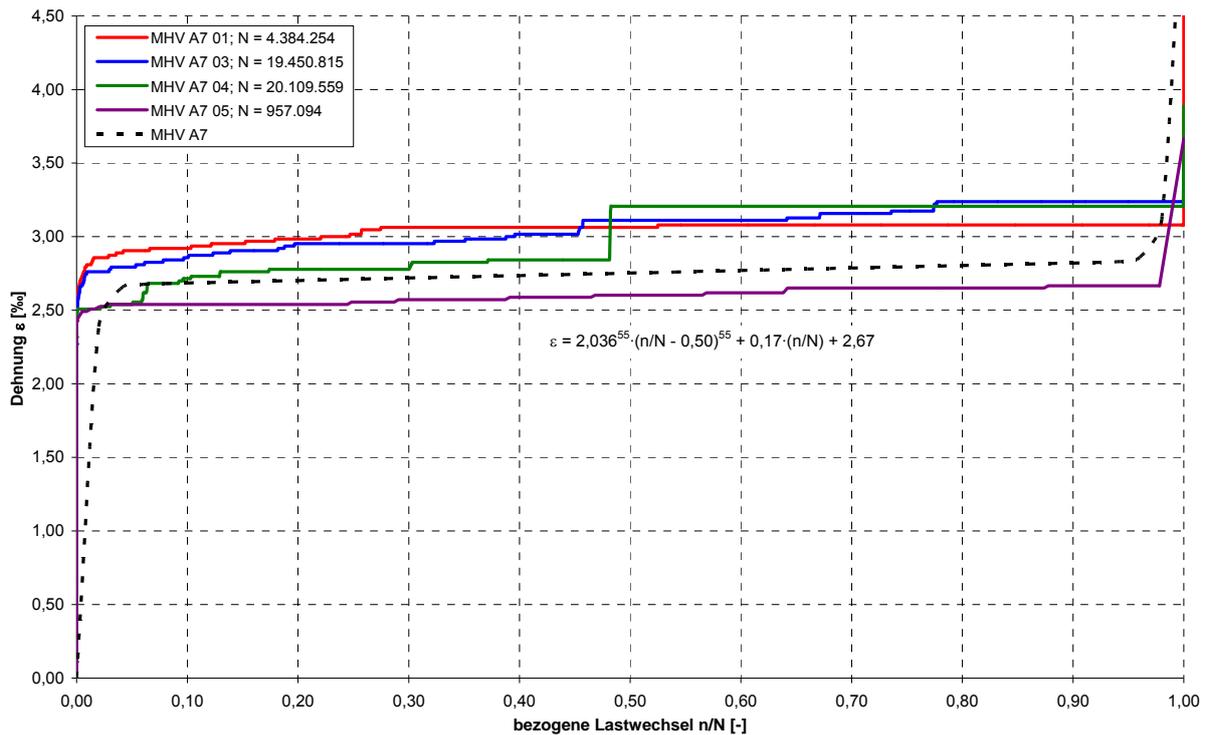


Bild 7.28: Schädigungsverlauf des UHPC (M3Q mSF mWB (MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)

Nach Auswertung der Schädigungsverläufe für die übrigen Serien C2, C7, D0 und D1 werden folgende Gleichungen als Näherung für den feinkörnigen UHPC M3Q vorgeschlagen:

Serie A7 ($\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$):

$$\varepsilon = 2,036^{55} \cdot (n/N - 0,50)^{55} + 0,17 \cdot (n/N) + 2,67 \quad [\%] \quad (7.34)$$

Serie C2 ($\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,2$):

$$\varepsilon = 1,996^{95} \cdot (n/N - 0,50)^{95} + 0,17 \cdot (n/N) + 0,83 \quad [\%] \quad (7.35)$$

Serie C7 ($\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$):

$$\varepsilon = 2,039^{55} \cdot (n/N - 0,50)^{55} + 0,25 \cdot (n/N) + 2,89 \quad [\%] \quad (7.36)$$

Serie D0 ($\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{cm} = 0,0$):

$$\varepsilon = 1,992^{95} \cdot (n/N - 0,50)^{95} + 0,27 \cdot (n/N) + 0,68 \quad [\%] \quad (7.37)$$

Serie D1 ($\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,1$):

$$\varepsilon = 1,980^{95} \cdot (n/N - 0,50)^{95} + 0,27 \cdot (n/N) + 0,38 \quad [\%] \quad (7.38)$$

Die zugehörigen Kurven des Schädigungsverlaufes sind im Bild 7.29 dargestellt. Es fällt auf, dass betragsmäßig höhere Druckspannungen höhere Dehnungen zur Folge haben. Des Weiteren ist festzustellen, dass mit betragsmäßig höheren Druckspannungen die Phasen I und III größer sind. Bei steigender Zugfestigkeit steigt außerdem die Neigung der Geraden in der Phase II.

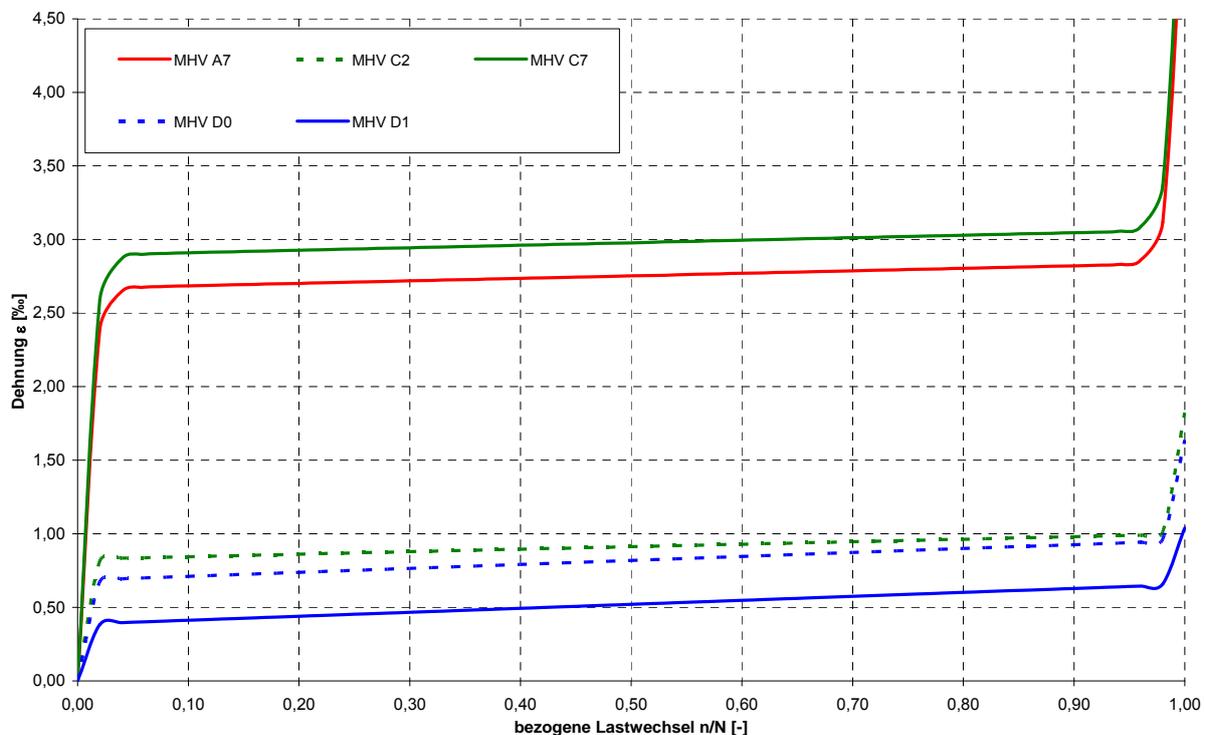


Bild 7.29: Schädigungsverläufe des UHPC, M3Q mSF mWB (MHV)

7.5.3 Schädigungsverlauf des grobkörnigen UHPC (B5Q)

Mit Hilfe der Ergebnisse und Erfahrungen der Ermüdungsversuche für den feinkörnigen UHPC werden im Folgenden die Schädigungsverläufe des grobkörnigen UHPC B5Q untersucht. Eine Vielzahl von Versuchen konnte dabei ausgewertet werden. Die Ergebnisse der Schädigungsverläufe für den grobkörnigen UHPC sind in der Anlage 12.8.2 dargestellt. Die einzelnen Schädigungskurven wurden verwendet um die folgenden Vorschläge für die einzelnen Versuchsserien zu definieren. Dabei wurden Mittelwerte der einzelnen Beiwerte verwendet um einen einfacheren Zusammenhang zu erhalten.

$$\text{Serie A3 } (\sigma_c/f_{ctm} = 0,2, \sigma_c/f_{cm} = -0,3):$$

$$\varepsilon = 2,000^{75} \cdot (n/N - 0,50)^{75} + 0,17 \cdot (n/N) + 1,00 \quad [\%] \quad (7.39)$$

$$\text{Serie A5 } (\sigma_c/f_{ctm} = 0,2, \sigma_c/f_{cm} = -0,5):$$

$$\varepsilon = 2,021^{65} \cdot (n/N - 0,50)^{65} + 0,17 \cdot (n/N) + 1,97 \quad [\%] \quad (7.40)$$

$$\text{Serie A7 } (\sigma_c/f_{ctm} = 0,2, \sigma_c/f_{cm} = -0,7):$$

$$\varepsilon = 2,038^{55} \cdot (n/N - 0,50)^{55} + 0,17 \cdot (n/N) + 2,82 \quad [\%] \quad (7.41)$$

$$\text{Serie B5 } (\sigma_c/f_{ctm} = 0,4, \sigma_c/f_{cm} = -0,5):$$

$$\varepsilon = 2,021^{65} \cdot (n/N - 0,50)^{65} + 0,20 \cdot (n/N) + 1,97 \quad [\%] \quad (7.42)$$

$$\text{Serie B7 } (\sigma_c/f_{ctm} = 0,4, \sigma_c/f_{cm} = -0,7):$$

$$\varepsilon = 2,038^{55} \cdot (n/N - 0,50)^{55} + 0,20 \cdot (n/N) + 2,82 \quad [\%] \quad (7.43)$$

$$\text{Serie C3 } (\sigma_c/f_{ctm} = 0,6, \sigma_c/f_{cm} = -0,3):$$

$$\varepsilon = 2,000^{75} \cdot (n/N - 0,50)^{75} + 0,25 \cdot (n/N) + 1,00 \quad [\%] \quad (7.44)$$

$$\text{Serie C5 } (\sigma_c/f_{ctm} = 0,6, \sigma_c/f_{cm} = -0,5):$$

$$\varepsilon = 2,021^{65} \cdot (n/N - 0,50)^{65} + 0,25 \cdot (n/N) + 1,97 \quad [\%] \quad (7.45)$$

$$\text{Serie C7 } (\sigma_c/f_{ctm} = 0,6, \sigma_c/f_{cm} = -0,7):$$

$$\varepsilon = 2,038^{55} \cdot (n/N - 0,50)^{55} + 0,25 \cdot (n/N) + 2,82 \quad [\%] \quad (7.46)$$

$$\text{Serie D5 } (\sigma_c/f_{ctm} = 0,8, \sigma_c/f_{cm} = -0,5):$$

$$\varepsilon = 2,021^{65} \cdot (n/N - 0,50)^{65} + 0,27 \cdot (n/N) + 1,97 \quad [\%] \quad (7.47)$$

$$\text{Serie D7 } (\sigma_c/f_{ctm} = 0,8, \sigma_c/f_{cm} = -0,7):$$

$$\varepsilon = 2,038^{55} \cdot (n/N - 0,50)^{55} + 0,27 \cdot (n/N) + 2,82 \quad [\%] \quad (7.48)$$

Bei genauerer Betrachtung der Gleichungen (7.39) bis (7.48) und der zugehörigen Schädigungsverläufe im Bild 7.30 fällt auf, dass einige der Beiwerte sich wiederholen. Der Beiwert a , welcher für die Höhe der Dehnung am ersten Wendepunkt verantwortlich ist, steigt mit betragsmäßig zunehmender Druckspannung. Das bedeutet, dass unabhängig von der Zugspannung die Höhe der Dehnung am ersten Wendepunkt lediglich von der Höhe der Druckspannung abhängt. Der Beiwert m , welche für die Länge bzw. die Kürze der Phasen I und III verantwortlich ist, fällt mit betragsmäßig steigender Druckspannung. Eine betragsmäßig höhere Druckspannung hat demnach längere und ausgerundete Phasen I und III zur Folge. Lediglich der Beiwert c , also die Steigung der Gerade in der Phase II, scheint von der Zugfestigkeit abhängig zu sein. Mit steigender Zugfestigkeit erhöht sich der Beiwert c und die Gerade der Phase II erhält eine höhere Steigung. Diese Folgerungen können tendenziell beim feinkörnigen UHPC auch festgestellt werden.

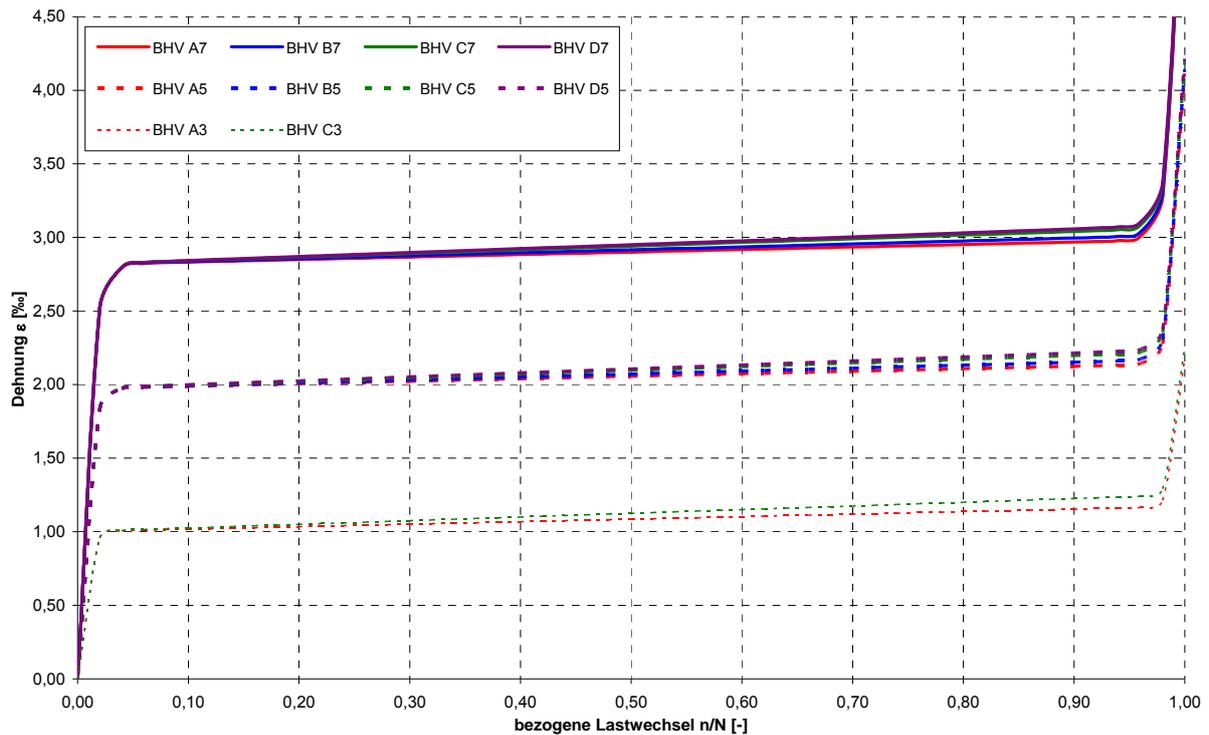


Bild 7.30: Schädigungsverläufe des UHPC, B5Q mSF mWB (BHV)

7.5.4 Zusammenfassung Schädigungsverlauf

Aus den ermittelten Schädigungsverläufen können für den ultrahochfesten Beton folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Im Vergleich zum Normalbeton und hochfesten Beton sind die Phasen I und III des Schädigungsverlaufs kürzer.
- Die erste Phase umfasst beim UHPC etwa 5% der Lebensdauer. Der Übergang von der zweiten zur dritten Phase erfolgt bei etwa 95% der Lebensdauer
- Die Neigung der Geraden in der konstanten Phase II ist im Vergleich zum Normalbeton und hochfesten Beton flacher.
- Um vergleichen zu können, ob bei gleicher Schwingbreite höhere Dehnungen aufgenommen werden können, fehlen vergleichbare Versuche für den Normalbeton und den hochfesten Beton.
- Die Höhe der Dehnung im ersten Wendepunkt und die Kürze der Phasen I und III sind allein von der Höhe der Druckspannung abhängig.
- Die Zugspannung beeinflusst lediglich die Steigung der Geraden in der Phase II. Bei geringer Zugspannung fällt die Neigung der Geraden flacher aus. Mit zunehmender Zugspannung ist eine steilere Neigung zu erwarten.

8 Bemessungsmodell

8.1 Nachweis der Ermüdung für Normalbeton

Der Nachweis der Ermüdung nach (fib 2010) darf nach einer von drei unterschiedlichen Methoden erfolgen. Die drei unterschiedlichen Methoden sind in (fib 2010) und in (DAfStb 1994a) mit Erläuterungen beschrieben. Im Folgenden ist eine kleine Übersicht über das Nachweiskonzept aufgeführt, dabei werden Auszüge aus (fib 2010) und (DAfStb 1994a) wiedergegeben. Ein Nachweis der Ermüdung nach (fib 2010) muss erfolgen, wenn Lastwechselzahlen $> 10^4$ zu erwarten sind.

Bei der ersten Methode (vereinfachte Methode) ist der Nachweis erfüllt, wenn die folgende Bedingung eingehalten ist:

Beton auf Druck:

$$\gamma_{Ed} \cdot \sigma_{c,max} \cdot \eta_c \leq 0,45 \cdot f_{cd,fat} \quad [\text{MPa}] \quad (8.1)$$

mit:

- γ_{Ed} Teilsicherheitsbeiwert zur Erfassung der Ungenauigkeiten des Modells zur Spannungsberechnung ($\gamma_{Ed} = 1,1$)
- $\sigma_{c,max}$ Maximale Betondruckspannung unter häufiger Lastfallkombination
- η_c Faktor zur Berücksichtigung der ungleichmäßigen Verteilung der Betondruckspannungen
- $f_{cd,fat}$ Bemessungswert der Betondruckfestigkeit unter wiederholter Belastung

$$f_{cd,fat} = 0,85 \cdot \beta_{cc}(t) \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad [\text{MPa}] \quad (8.2)$$

mit:

- $\beta_{cc}(t)$ Koeffizient zur Berücksichtigung des Festigkeitsanstiegs infolge fortschreitender Hydratation
- f_{ck} Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit
- γ_c Materialteilsicherheitsbeiwert des Betons ($\gamma_c = 1,5$)

Beton auf Zug:

$$\gamma_{Ed} \cdot \sigma_{ct,max} \leq 0,33 \cdot f_{ctd,fat} \quad [\text{MPa}] \quad (8.3)$$

mit:

- $\sigma_{ct,max}$ Maximale Betonzugspannung unter häufiger Lastfallkombination
- $f_{ctd,fat}$ Bemessungswert der Betonzugfestigkeit unter wiederholter Belastung

$$f_{ctd,fat} = f_{ctk0,05} / \gamma_{c,fat} \quad [\text{MPa}] \quad (8.4)$$

mit:

- $f_{ctk0,05}$ 5%-Quantile der Betonzugfestigkeit
- $\gamma_{c,fat}$ Materialteilsicherheitsbeiwert des Betons bei Ermüdung ($\gamma_{c,fat} = 1,5$)

Bei der zweiten Methode (Nachweis auf der Grundlage der Maximalbeanspruchung) muss nachgewiesen werden, dass die im Bemessungszeitraum erwartete Beanspruchungsspielzahl n niedriger ist als die Bruchlastwechselzahl N , also $n < N$. Die Bruchlastwechselzahl wird dabei aus der Wöhlerlinie des Betons ermittelt. Mit Hilfe der maximalen Betonspannungen, die sich unter häufiger Lastfallkombination ergeben, kann die Bruchlastwechselzahl ermittelt werden. Dabei gelten für die Wöhlerlinien die folgenden Gleichungen. Während die Wöhlerlinie für Beton unter Zugschwellbeanspruchung eine Gerade in Abhängigkeit der bezogenen Zugoberspannung ergibt, wird bei Beton unter Druckschwellbeanspruchung eine dreiteilige Wöhlerlinie mit der Unterspannung als Scharparameter gefordert.

Beton unter Druckbeanspruchung:

Für $0 < S_{c,\min} < 0,8$

a) und $\log N_1 \leq 6$ gilt:

$$\log N = \log N_1 = (12 + 16 \cdot S_{c,\min} + 8 \cdot S_{c,\min}^2) \cdot (1 - S_{c,\max}) \quad [-] \quad (8.5)$$

mit:

$S_{c,\min}$ Bezogene minimale Betondruckspannung

$$S_{c,\min} = \frac{|\sigma_{c,\min}|}{f_{ck,fat}} \quad [-] \quad (8.6)$$

$\sigma_{c,\min}$ Minimale Betondruckspannung

$S_{c,\max}$ Bezogene maximale Betondruckspannung

$$S_{c,\max} = \frac{|\sigma_{c,\max}|}{f_{ck,fat}} \quad [-] \quad (8.7)$$

b) oder $\log N_1 > 6$ und $\Delta S_c \geq 0,3 - 0,375 \cdot S_{c,\min}$ gilt:

$$\log N = \log N_2 = 0,2 \cdot \log N_1 \cdot (\log N_1 - 1) \quad [-] \quad (8.8)$$

mit:

ΔS_c Bezogene Spannungsschwingbreite der Betondruckspannung

$$\Delta S_c = |S_{c,\max}| - |S_{c,\min}| \quad [-] \quad (8.9)$$

c) oder $\log N_1 > 6$ und $\Delta S_c < 0,3 - 0,375 \cdot S_{c,\min}$ gilt:

$$\log N = \log N_3 = \log N_2 \cdot (0,3 - 0,375 \cdot S_{c,\min}) / \Delta S_c \quad [-] \quad (8.10)$$

Beton unter Zugbeanspruchung:

a) überwiegend Zug $\sigma_{ct,max} > 0,026 \cdot |\sigma_{c,max}|$:

$$\log N = 12 \cdot (1 - S_{ct,max}) \quad [\text{MPa}] \quad (8.11)$$

mit:

$S_{ct,max}$ Bezogene maximale Betonzugspannung

$$S_{ct,max} = \frac{\sigma_{ct,max}}{f_{ctk,min}} \quad [-] \quad (8.12)$$

b) überwiegend Druck $\sigma_{ct,max} \leq 0,026 \cdot |\sigma_{c,max}|$:

$$\log N = 9 \cdot (1 - S_{c,max}) \quad [\text{MPa}] \quad (8.13)$$

Bei Wechselbeanspruchung müssen beide Bedingungen für Druck- und Zugbelastung erfüllt sein, mit jeweils $\sigma_{ct,min} = 0$ für Zugbeanspruchung und $\sigma_{c,min} = 0$ für Druckbeanspruchung.

Die grafische Darstellung der unterschiedlichen Wöhlerlinien ist im Bild 8.1 dargestellt. Dabei sind die Wöhlerlinien des Normalbetons unter Druckbeanspruchung als Geradenscharen in Abhängigkeit der Unterspannung (blaue Linien) dargestellt. Beim Beton mit überwiegender Zugbeanspruchung ist unabhängig von der Unterspannung immer dieselbe Gerade (rote Linie) maßgebend. Bei Wechselbeanspruchung mit überwiegender Druckbeanspruchung ist unabhängig von der Unterspannung die Gerade nach Gleichung (8.13) (grüne Linie) maßgebend.

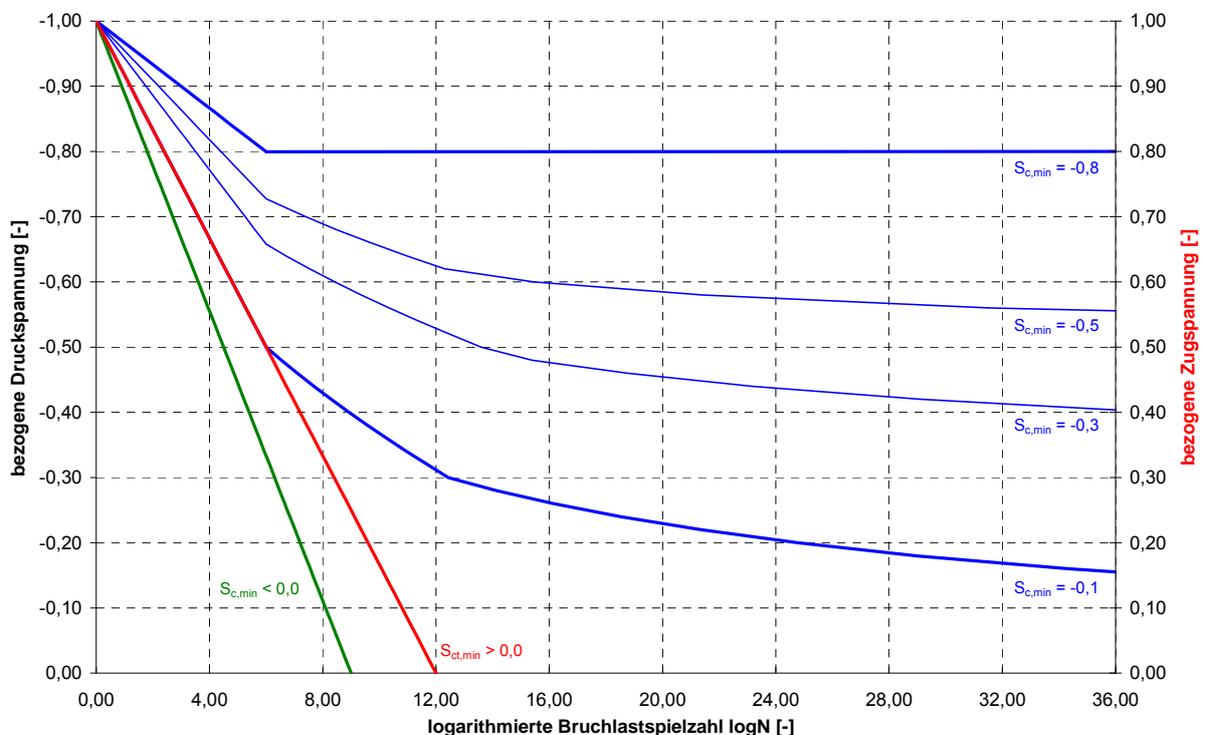


Bild 8.1: Wöhlerlinien des Normalbetons unter Druck- bzw. Zugbeanspruchung nach (fib 2010)

Bei der dritten und exaktesten Methode (Nachweis auf der Grundlage des Beanspruchungsspektrums) muss das gesamte Beanspruchungskollektiv des Normalbetons während der Betriebszeit bekannt sein. Dabei wird die tatsächlich während der Lebensdauer des Bauteils auftretende Anzahl der Spannungsspiele $n(\Delta\sigma_i)$ mit der Schwingbreite $\Delta\sigma_i$, der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_i$ zugeordneten Bruchlastspielzahl $N(\Delta\sigma_i)$ gegenüber gestellt. Die Schädigung des in j -Blöcke jeweils konstanter Schwingbreite der Beanspruchung unterteilten Beanspruchungskollektivs ist nach der linearen Schadensakkumulationshypothese zu berechnen. Bei Einhaltung der folgenden Gleichung ist der Nachweis erbracht:

$$D_{\text{Ed}} = \sum_{i=1}^j \frac{n(\Delta\sigma_i)}{N(\Delta\sigma_i)} \leq 1 \quad [-] \quad (8.14)$$

8.2 Nachweis der Ermüdung für ultrahochfesten Beton

8.2.1 Allgemeines

Der Nachweis der Ermüdung für ultrahochfesten Beton soll ebenfalls nach drei unterschiedlichen Nachweismethoden erfolgen. Das Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton unter Druckschwellbeanspruchung wurde bereits in (Wefer 2010) untersucht. Des Weiteren wird in (Wefer 2010) für den Nachweis der Ermüdung von UHPC im Druckschwellbereich ein Bemessungsansatz vorgeschlagen. Da bei Ermüdung im Druck-Zug-Wechselbereich sowohl der Nachweis unter Druckbeanspruchung als auch unter Zugbeanspruchung erfüllt werden muss, wird im Folgenden nur auf den Nachweis unter Zugbeanspruchung eingegangen und ein Vorschlag zur Bemessung definiert. Der Nachweis von UHPC unter Druckbeanspruchung ist nach (Wefer 2010) zu führen.

Die im Folgenden vorgeschlagenen Bemessungsnachweise werden dabei mit Hilfe der grobkörnigen UHPC Mischung B5Q ermittelt, da diese für die Bauindustrie praxistauglicher und wirtschaftlicher ist.

8.2.2 Bemessungswert der Betonzugfestigkeit unter wiederholter Belastung

Der für die erste Methode des Nachweises (vereinfachte Methode) erforderliche Bemessungswert der Betonzugfestigkeit ($f_{\text{ctd,fat}}$) soll als erstes für den UHPC überprüft werden. Dabei wird der Bemessungswert der Betonzugfestigkeit nach folgender Gleichung (8.4) berechnet. Der Teilsicherheitsbeiwert wird nach einer Überprüfung, wie auch in (Wefer 2010), zu $\gamma_{\text{c,fatUHPC}} = 1,5$ gesetzt. Im nächsten Schritt muss die 5%-Quantile der Betonzugfestigkeit überprüft werden.

$$f_{\text{ctd,fat}} = f_{\text{ctk0,05}} / \gamma_{\text{c,fat}} \quad [\text{MPa}] \quad (8.4)$$

In (fib 2010) wird für die Berechnung der 5%-Quantile der zentrischen Zugfestigkeit die folgende Gleichung definiert:

$$f_{\text{ctk0,05}} = \alpha \cdot f_{\text{ctm}} = 0,7 \cdot f_{\text{ctm}} \quad [\text{MPa}] \quad (8.15)$$

Nach eigener Berechnung mit Hilfe der statischen Zugversuche ergibt sich der Vorfaktor α für den UHPC zu:

$$\alpha = \frac{f_{ctk0,05}}{f_{ctm}} = \frac{f_{ctm} - 1,645 \cdot s_x}{f_{ctm}} = \frac{8,59 - 1,645 \cdot 0,841}{8,59} = \frac{8,59 - 1,645 \cdot 0,841}{8,59} = 0,839$$

Die Betonzugfestigkeit wurde im Abschnitt 5.3 bereits beschrieben. In Abhängigkeit der mittleren Zylinderdruckfestigkeit wurde dabei folgende Gleichung für die mittlere Zugfestigkeit vorgeschlagen:

B5Q:

$$f_{ctm} = 2,83 \cdot \ln(1 + f_{cm}/10) \quad [\text{MPa}] \quad (5.8)$$

Auf der sicheren Seite liegend wird die Gleichung aus (fib 2010) für die Berechnung der 5%-Quantile der zentrischen Zugfestigkeit belassen. Damit ergeben sich zur Berechnung des Bemessungswertes für die Betonzugfestigkeit unter wiederholter Belastung folgende Gleichungen:

$$f_{ctd, \text{fatUHPC}} = f_{ctk0,05\text{UHPC}} / \gamma_{c, \text{fatUHPC}} \quad [\text{MPa}] \quad (8.16)$$

mit:

$$\gamma_{c, \text{fatUHPC}} \quad \text{Materialteilsicherheitsbeiwert des Betons bei Ermüdung} \quad (\gamma_{c, \text{fatUHPC}} = 1,5)$$

und:

$$f_{ctk0,05\text{UHPC}} = 0,7 \cdot f_{ctm\text{UHPC}} \quad [\text{MPa}] \quad (8.17)$$

mit:

$$f_{ctm\text{UHPC}} = 2,83 \cdot \ln(1 + f_{cm}/10) \quad [\text{MPa}] \quad (8.18)$$

8.2.3 Bemessungskonzept

Für den ultrahochfesten Beton ist bei der ersten Methode (vereinfachte Methode) der Nachweis unter Zugbeanspruchung erfüllt, wenn die folgende Bedingung eingehalten ist:

Beton auf Zug:

$$\gamma_{Ed} \cdot \sigma_{ct, \text{max}} \leq 0,33 \cdot f_{ctd, \text{fatUHPC}} \quad [\text{MPa}] \quad (8.19)$$

Für die zweite Nachweismethode müssen die Wöhlerlinien des UHPC unter Druck-Zug-Wechselbeanspruchung für die grobkörnige UHPC Mischung B5Q zur Hilfe genommen werden. Dabei werden die Wöhlerlinien sowohl gegen die bezogene Druck- als auch gegen die bezogene Zugspannung abgebildet.

Die Wöhlerlinien für den Normalbeton im Bild 8.1 schneiden die y-Achse bei einer Ober-spannung von 100%. Für den Bemessungsansatz des UHPC muss aus den Ergebnissen der Ermüdungsversuche eine entsprechende Wöhlerlinie festgelegt werden. Im Bild 8.2 sind die Ergebnisse der Ermüdungsversuche des grobkörnigen UHPC B5Q mit der bezogenen Zugspannung als Geradenschar dargestellt. Zusätzlich ist im Bild 8.2 ein Vorschlag für eine Wöhlerlinie mit den Schnittpunkten (0|-1,0) und (8| σ_u/f_{cm} ($\sigma_u/f_{ctm} = 0,6$)) eingezeichnet. Wichtig ist dabei, dass die Ermüdungsversuche mit betragsmäßig hoher Druckspannung durch den Vorschlag erfasst sind.

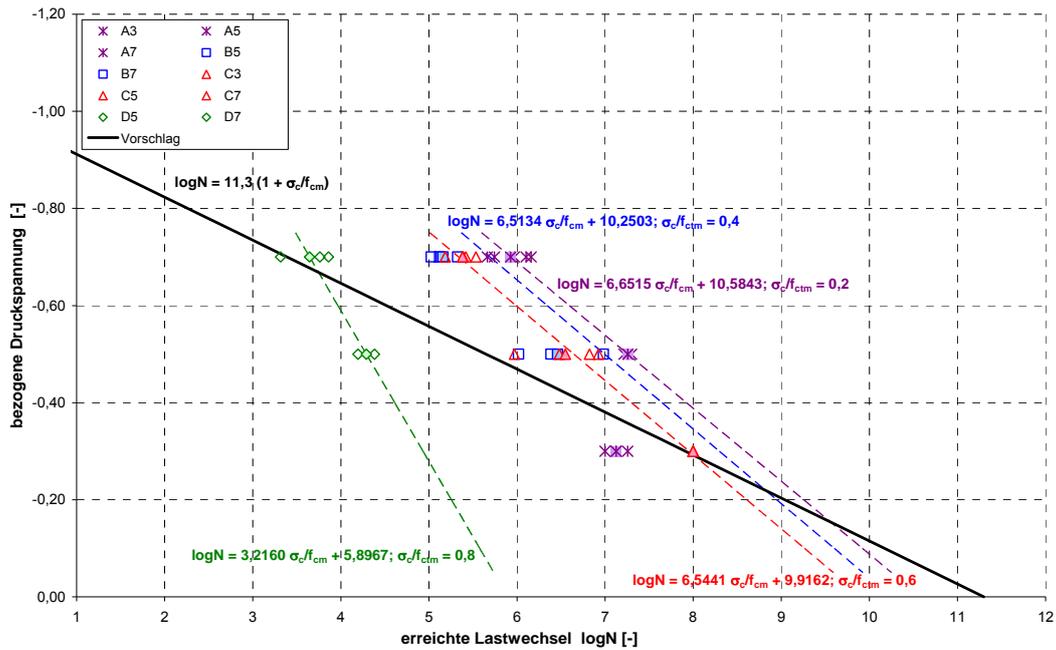


Bild 8.2: Modifizierte Wöhlerlinien des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$; $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$)

Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse der Wöhlerlinien in Abhängigkeit der bezogenen Zugspannung (Bild 8.3) dargestellt. Der Bemessungsansatz des UHPC sollte alle Versuche mit betragsmäßig geringerer Druckunterspannung erfassen. Ein Vorschlag für einen Bemessungsansatz ist ebenfalls im Bild 8.3 dargestellt. Die Versuche bei einer bezogenen Zugspannung $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$ sind Durchläufer und können somit für den Ansatz ignoriert werden. Die Versuche mit einer betragsmäßig hohen Druckunterspannung werden durch den ersten Bemessungsansatz abgedeckt.

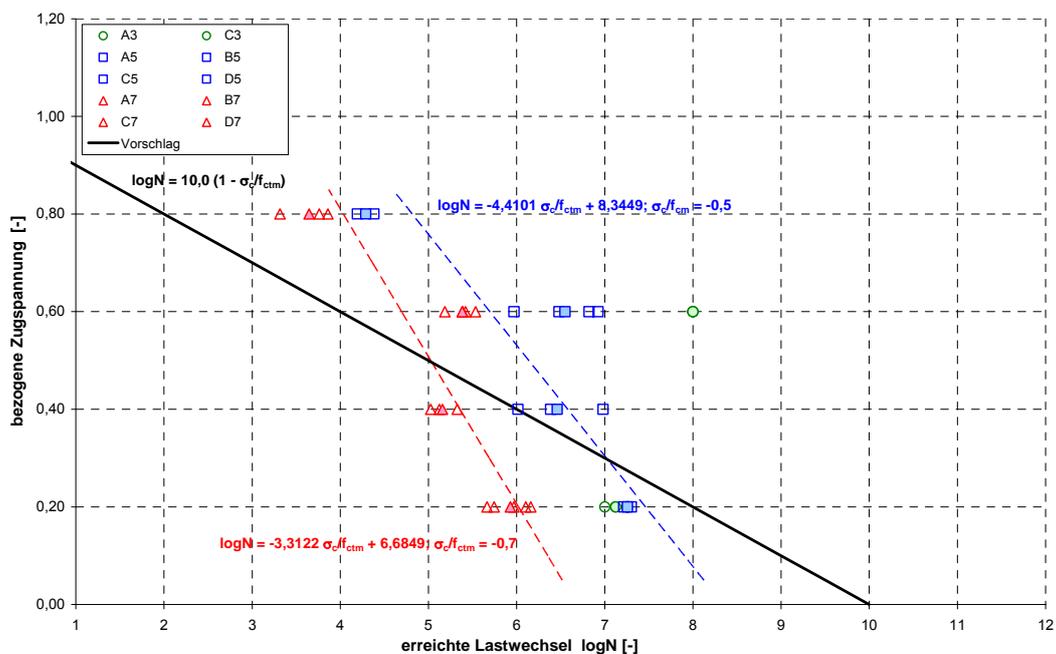


Bild 8.3: Wöhlerlinien des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = -0,7$; $\sigma_c/f_{ctm} = -0,5$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = -0,3$)

Mit Hilfe der beiden Bemessungsvorschläge kann nun der Nachweis bei der zweiten Methode (Nachweis auf der Grundlage der Maximalbeanspruchung) wie folgt beschrieben werden. Die Nachweise für UHPC unter Druckbeanspruchung sind nach (Wefer 2010) zu führen.

Beton unter Zugbeanspruchung:

a) überwiegend Zug $S_{c,min} > -0,6$:

$$\log N = 10 \cdot (1 - S_{ct,max}) \quad [\text{MPa}] \quad (8.20)$$

b) überwiegend Druck $S_{c,min} < -0,6$:

$$\log N = 11,3 \cdot (1 + S_{c,max}) \quad [\text{MPa}] \quad (8.21)$$

Mit Hilfe der beiden Gleichungen kann der Nachweis für den UHPC unter Wechselbeanspruchung erfolgen. Es ist zu beachten, dass eine Unterscheidung in zwei Gruppen durch die Grenze der Unterspannung $\sigma_c/f_{cm} = -0,6$ erfolgt. In einem weiteren Schritt werden für Versuche mit voraussichtlichem Zugversagen ($\sigma_c/f_{cm} > -0,6$) die Gleichung (8.20) in Abhängigkeit der Zugspannung verwendet. Im Gegensatz dazu, sind für Versuche mit voraussichtlichem Druckversagen ($\sigma_c/f_{cm} < -0,6$), die Gleichung (8.21) in Abhängigkeit der Druckspannung zu verwenden.

Im Bild 8.4 sind die Bemessungsvorschläge nach (Wefer 2010) (blaue Linien) und den Gleichungen (8.20) (rote Linie) und (8.21) (grüne Linie) den Bemessungsgleichungen aus (fib 2010) (gestrichelte Linien) gegenübergestellt. Die neuen Ansätze liegen im Bereich des Normalbetons und zeigen eine gute Eingliederung in das bisherige Bemessungskonzeptes. Die Bemessungsvorschläge des UHPC sollten aufgrund der geringen Anzahl von Versuchen dennoch an weiteren Ermüdungsversuchen verifiziert und evtl. optimiert werden.

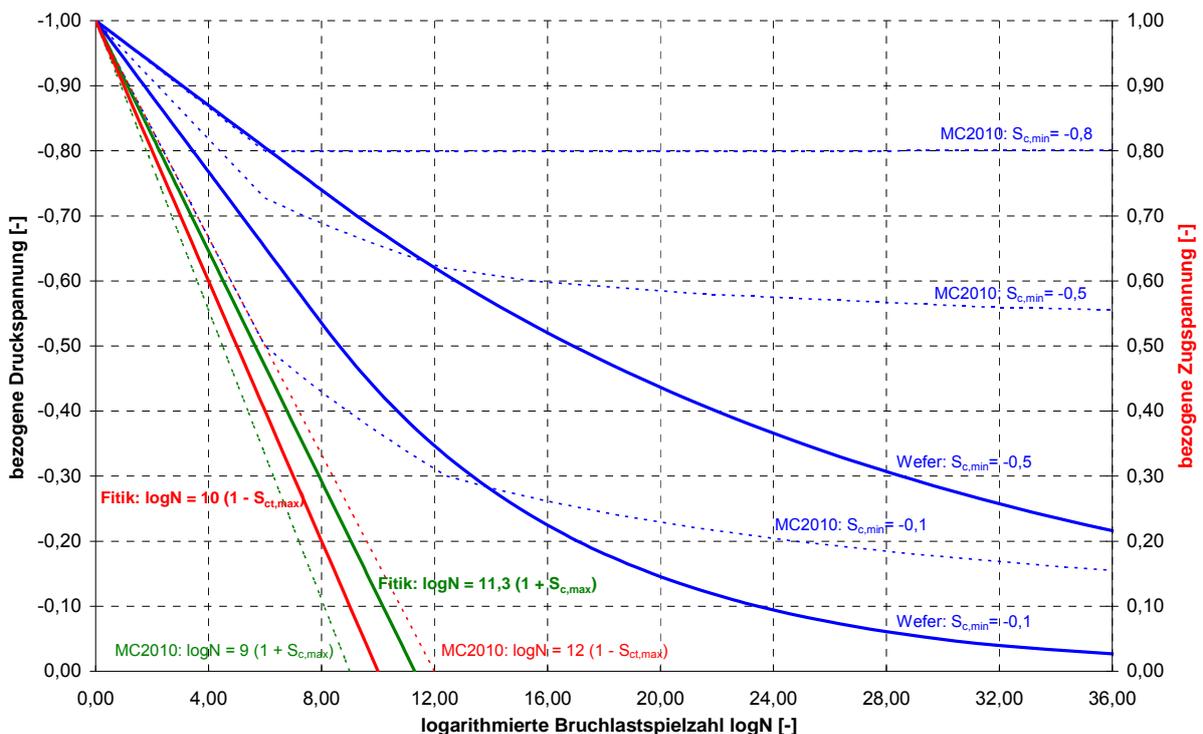


Bild 8.4: Vergleich der Bemessungsvorschläge (teilweise aus (Wefer 2010) und (fib 2010))

Die dritte Nachweismethode (Nachweis auf der Grundlage des Beanspruchungsspektrums) für ultrahochfesten Beton bleibt unverändert und ist wie für den Normalbeton zu führen.

9 Ermüdungsverhalten von Leichtbeton

9.1 Allgemeines

Leichtbeton (insbesondere hochfester Leichtbeton) verhält sich bei Ermüdungsversuchen, gegensätzlich zum Normalbeton, ähnlich wie ultrahochfester Beton. Leichtbeton besitzt ein ähnliches Verhältnis zwischen der Zementmatrix und dem Zuschlag wie UHPC. In diesem Abschnitt wird deshalb ein Einblick in das Ermüdungsverhalten von Leichtbeton wiedergegeben und mit dem ultrahochfesten Beton verglichen.

Leichtbetone werden über ihre Druckfestigkeit und Trockenrohddichte klassifiziert. Diese Kenngrößen können innerhalb großer Bandbreiten variiert werden angesichts des breiten Spektrums unterschiedlichster Leicht- und Feinzuschläge und ihrer Kombinationen, mit denen Zylinderdruckfestigkeiten $f_{ck} = 15$ bis 90 MPa bei Trockenrohddichten von $1,0 \leq \rho \leq 2,0$ kg/dm^3 ermöglicht werden. In dem Bereich $0,8 \leq \rho \leq 1,0$ kg/dm^3 werden Leichtbetone der Güte LC 8/9 und LC 12/13 hergestellt, die z.B. als tragende Innenwände nur in bescheidenem Rahmen konstruktiven Anforderungen genügen müssen. Daher wird das Spektrum der konstruktiven Leichtbetone auf $1,0 \leq \rho \leq 2,0$ kg/dm^3 beschränkt (s. Bild 9.1). Mit dem Begriff „Hochleistungsleichtbetone“ (HPLWAC = high performance lightweight aggregate concrete) wird die Leistungsfähigkeit von Leichtbetonen gewürdigt, die in Anbetracht ihrer Rohdichte eine hohe Festigkeit aufweisen und zudem höchsten Ansprüchen an die Dauerhaftigkeit genügen. Eine Untergruppierung der Hochleistungsleichtbetone bilden die „hochfesten Leichtbetone“ (HSLWAC) mit einer Zylinderdruckfestigkeit von $f_{1ck} \geq 55$ MPa. Für den Begriff „hochfest“ gilt damit die gleiche Grenze wie bei Normalbeton (NSC) (Faust 2003).

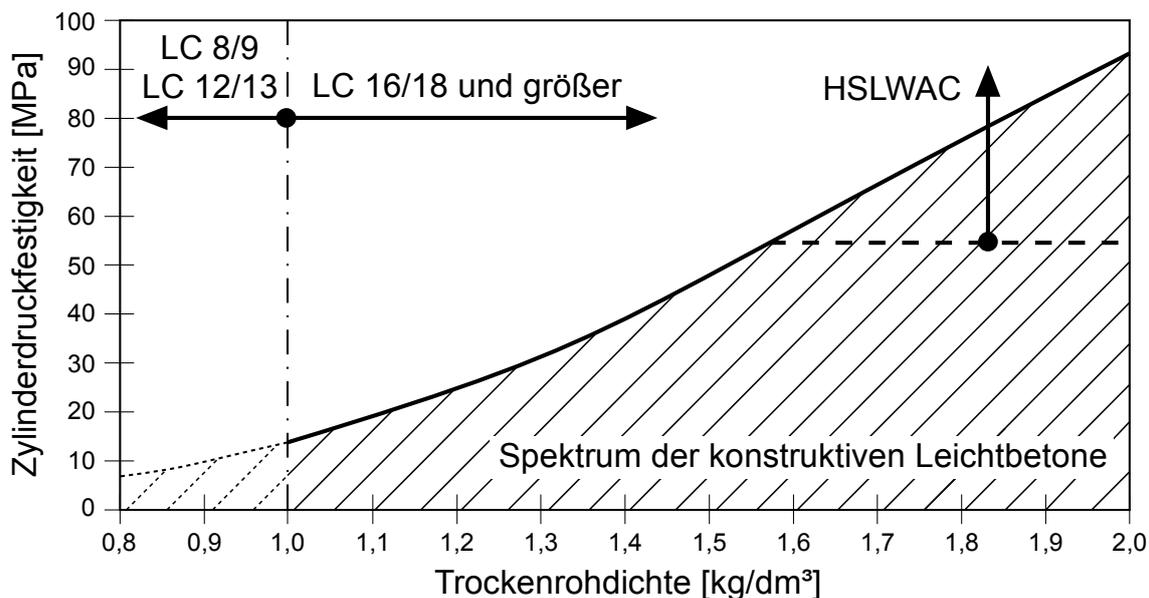


Bild 9.1: Spektrum der konstruktiven Leichtbetone (aus Faust 2003)

9.2 Literaturdurchsicht Ermüdungsverhalten

9.2.1 Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau

Nach (Faust 2003) wurde in mehreren Veröffentlichungen das Ermüdungsverhalten von Leichtbeton unter Druck- und Biegebeanspruchung ebenbürtig dem von Normalbeton und hochfestem Beton erachtet. Als Ursache wird die elastische Kompatibilität des Leichtbetons angeführt, da Ermüdungsbrüche im Allgemeinen von Mikrorissen ausgehen, die damit im engen Zusammenhang mit der Materialermüdung zu sehen sind. Es wurde gezeigt, dass die

Spannungs-Dehnungs-Beziehung bei Leichtbeton auch nach hohen Lastspielzahlen einen nahezu linear elastischen Charakter zeigt, während selbst bei hochfestem Normalbeton ein hysteretisches Verhalten zu beobachten ist.

Allerdings ist bei einem Anriss in einem Leichtbetonbauteil mit einem vergleichsweise beschleunigten Risswachstum zu rechnen. Es ist auch denkbar, dass der Verbund zwischen Leichtbeton und Bewehrung bei einer Ermüdungsbeanspruchung frühzeitiger versagt. Aus diesen Gründen soll in der Normung eine gesonderte, anwendungsbezogene Ermüdungsbeurteilung bei Leichtbeton durchgeführt werden.

9.2.2 Ermüdung von Betonkonstruktionen

Nach (CEB-FIP 1988) ist das Ermüdungsverhalten von Leichtbeton vergleichbar mit dem von Normalbeton (Tepfers, Kutti 1979). Des Weiteren wird eine Abhängigkeit vom Verhältnis Zuschlag zur Zementmatrix vermutet. Ermüdungsversuche im Zugschwellbereich zeigen bessere Ergebnisse für den Leichtbeton. Die Versuche wurden jedoch mit Prüfkörpern, die mit Wasser gesättigt worden sind, durchgeführt (Saito 1984). Ähnliche Ergebnisse wurden für trockene Prüfkörper durch (Cornelissen, Reinhardt 1984) sowohl im Zugschwell- als auch im Wechselbereich erzielt. Druckschwellversuche an bewehrten, mit Wasser durchdrängten Versuchen zeigen auch hier bessere Ergebnisse als für den normalfesten Beton ((Waagaard 1981) und (Waagaard 1986)).

9.2.3 Ermüdungseigenschaften des Leichtbetons

Die ersten Ermüdungsversuche an Leichtbeton wurden von (Gray et al. 1961) durchgeführt. Dabei wurde ein „normalfester“ Leichtbeton (LB) mit einer Zylinderdruckfestigkeit von $f_c = 25,5$ MPa und ein „hochfester“ Leichtbeton (HLB) mit einer Festigkeit von $f_c = 42,8$ MPa verwendet. Untersucht wurde die Ermüdungsfestigkeit an jeweils fünf Zylindern (75/150 mm). Die Probekörper wurden 28 Tage unter Wasser gelagert und erhielten anschließend vier bis fünf Tage eine Wärmebehandlung von 105°C. Bis zum Versuch wurden die Prüfkörper anschließend unter Normklima gelagert. Die Versuche erfolgten an zwei unterschiedlichen Maschinen mit einer Frequenz von $f = 8,3$ bzw. 17 Hz. Die Unterspannung betrug $\sigma_u = 0,02-0,04 \cdot f_c$. Die Oberspannung variierte zwischen $\sigma_o = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7$ und $0,8 \cdot f_c$.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen wurde festgestellt, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen dem „normalfesten“ Leichtbeton und dem „hochfesten“ Leichtbeton bestehen. Ferner wurde festgestellt, dass keine signifikanten Unterschiede bei den Neigungen der Wöhlerlinien zwischen dem Leichtbeton und dem Normalbeton bestehen. Ein Vergleich mit Versuchen ohne Luftporen bzw. erhöhtem Luftporengehalt hat jedoch einen Einfluss erkennen lassen.

9.2.4 Dauerschwell- und Betriebsfestigkeit von Konstruktions-Leichtbeton

Die ersten Ermüdungsversuche an Leichtbeton in Deutschland wurden an der Technischen Hochschule in Darmstadt durchgeführt. In (DAfStb 1975) wurde ein Leichtbeton mit dem Zuschlag Blähschiefer Berwilit untersucht. Die Rohdichte betrug dabei $\rho = 1,66$ kg/dm³. Die zylindrischen Prüfkörper (50/100 mm) wurden sieben Tage unter Wasser und anschließend unter Normklima gelagert. Die Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen betrug $f_{cm,cu200} = 38$ MPa. Vor Versuchsbeginn wurde die Druckfestigkeit entweder an Zylindern (50/100 mm) und/oder an Würfeln (70/70/70 mm) ermittelt. Als Prüfmaschine standen zwei Geräte zur Verfügung. Ein Hochfrequenzpulsator ($f = 200$ Hz) und eine servohydraulische Prüfmaschine der Firma Schenck ($f = 0,1; 1$ bzw. 10 Hz). Es wurden drei Wöhlerlinien ermittelt. Die Unterspannung wurde dabei konstant auf $\sigma_u = 0,05; 0,2$ bzw. $0,4 \cdot f_c$ belassen und je nach Wöhlerlinie die Oberspannung in mehreren Stufen erhöht. Nach (DAfStb 1975) hat die Prüffrequenz unterhalb einer Oberspannung von $\sigma_o = 0,8 \cdot f_c$ keinen Einfluss. Oberhalb dieser Oberspannung

jedoch führt eine kleinere Frequenz zu geringeren erreichbaren Lastwechselzahlen. Die Streuungen bei allen Versuchen waren vergleichbar, so dass eine lineare Regression angewandt wurde.

9.2.5 Festigkeit und Schädigung von Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung

Die nahezu übereinstimmenden Dauerfestigkeitsschaubilder von Leichtbeton und Normalbeton scheinen die formulierten Annahmen zu bestätigen, dass die Ermüdung des Betons primär durch fortschreitende Rissbildung im Zementstein ausgelöst wird (Klausen 1978).

Die beschriebenen Versuche wurden an Leichtbeton mit einer Rohdichte von $\rho = 1,66 \text{ kg/dm}^3$ durchgeführt. Die Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen betrug dabei $f_{\text{cm,cu200}} = 38 \text{ MPa}$. Die Versuche wurden in einer Prüfmaschine mit $f = 200 \text{ Hz}$ gefahren. Die Unterspannung wurde dabei konstant bei $\sigma_u = 0,2 \cdot f_c$ belassen. Die Oberspannung wurde zwischen $\sigma_o = 0,6 - 0,674 \cdot f_c$ in sechs Stufen variiert. Die Streuungen liegen dabei im Bereich der Streuungen der Kurzzeitfestigkeit. Die Dauerfestigkeit des Normalbetons liegt oberhalb des Leichtbetons. Für das Treppenstufenverfahren gilt dabei, dass der Mittelwert beim Start für den Normalbeton oberhalb des Leichtbetons liegt.

9.2.6 Ermüdungsfestigkeit von Normal- und Leichtbeton

In Schweden wurden ebenfalls Ermüdungsversuche an Leichtbeton durchgeführt (Tepfers, Kutti 1979). Es wurden dabei drei Serien untersucht. Die erste Serie wurde zum Vergleich mit Normalbeton untersucht. Die zweite und die dritte Serie waren Leichtbetone mit den Rohdichten $\rho = 1,80 \text{ kg/dm}^3$ bzw. $\rho = 1,51 \text{ kg/dm}^3$. Die Zylinderdruckfestigkeit betrug dabei bei der Serie 1 $f_{\text{cm,cyl150}} = 45,4 \text{ MPa}$. Bei der zweiten und dritten Serie betrug die Festigkeit $f_{\text{cm,cyl150}} = 12,4 \text{ MPa}$ bzw. $f_{\text{cm,cyl150}} = 11,9 \text{ MPa}$. Die verwendeten Prüfkörper waren Zylinder (150/300 mm). Die Versuche wurden mit einer Frequenz von $f = 0,5$ (für $\sigma_o \geq 0,85 \cdot f_c$) bzw. 5 Hz (für $\sigma_o < 0,85 \cdot f_c$) gefahren. Die Oberspannung wurde variiert zwischen $\sigma_o = 0,95; 0,90; 0,85; 0,80; 0,75; 0,70 \cdot f_c$. Das Spannungsverhältnis wurde dabei konstant bei $R = \sigma_u / \sigma_o = 0,2$ gehalten. Festzustellen ist, dass bei einer Oberspannung von $\sigma_o \geq 0,80 \cdot f_c$ Streuungen der Versuchsergebnisse vorhanden sind. Gründe könnten die Probleme bei der exakten Ermittlung der statischen Druckfestigkeit und Kriecheinflüsse sein. Es sind jedoch keine Unterschiede im Ermüdungsverhalten zwischen Normalbeton und Leichtbeton festzustellen.

9.2.7 Ermüdung von Normal- und Leichtbeton

Der Einfluss der Frequenz wurde von mehreren Forschungsteilnehmern untersucht (Euro-LightCon 2000). Dabei wurde festgestellt, dass Frequenzen zwischen $f = 1 - 15 \text{ Hz}$ nur einen kleinen Einfluss auf Versuche mit einer Schwingbreite von $2\sigma_a = (\sigma_o - \sigma_u) \leq 75\%$ haben. Bei höheren Schwingbreiten verringern sich die Lastwechselzahlen bei Reduktion der Frequenz. Eine Verringerung der Frequenz um den Faktor 100 bewirkt eine Verringerung der Lastwechsel um den Faktor $\sqrt{100}$. Zusätzlich werden Empfehlungen für durchzuführende Ermüdungsversuche ausgesprochen. Es sollten Zylinder (100/250 mm) verwendet werden. Für das Lagerungsverhalten bzw. die Nachbehandlung der Prüfkörper gibt es keine Untersuchungen. Es wird lediglich empfohlen, die Versuche unter Normklima durchzuführen. Das Prüfalter der Zylinder sollte mindestens 28 Tage betragen. Die Frequenz sollte konstant bei $f = 5 \text{ Hz}$ gehalten werden.

9.3 Vergleich der Versuchsergebnisse

Um einen besseren Überblick über die bisher durchgeführten Versuche und deren Ergebnisse zu erhalten, werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse aus früheren Versuchen in Diagrammen dargestellt. Dabei werden zusätzlich die Ergebnisse aus Ermüdungsversuchen an hochfestem Beton (König et al. 2006) und ultrahochfestem Beton (Grünberg et al. 2007) hinzugezogen.

Das erste Bild 9.2 zeigt eine Übersicht über alle bisherigen Versuche und deren Ergebnisse. Die bisher am meisten verbreiteten Ergebnisse für den Normalbeton wurden in (Klausen 1978) veröffentlicht. Zusätzlich gibt es einige Ergebnisse aus Versuchen, bei denen der Normalbeton als Vergleichsbeton bzw. als Referenzbeton verwendet worden ist ((Tepfers, Kutti 1979) bzw. (Rings 1986)). Die Versuche an Leichtbeton wurden im vorhergehenden Abschnitt beschrieben. Insgesamt gibt es drei verschiedene Quellen, die Untersuchungen an Leichtbeton durchgeführt haben und Ergebnisse darstellen ((Gray et al. 1961); (DAfStb 1975) bzw. (Tepfers, Kutti 1979)).

Im Bild 9.2 ist die Doppelspannungsamplitude gegen die erreichte Lastwechselzahl dargestellt. Es fällt auf, dass im Bereich hoher Doppelspannungsamplituden sehr viele Versuche durchgeführt worden sind.

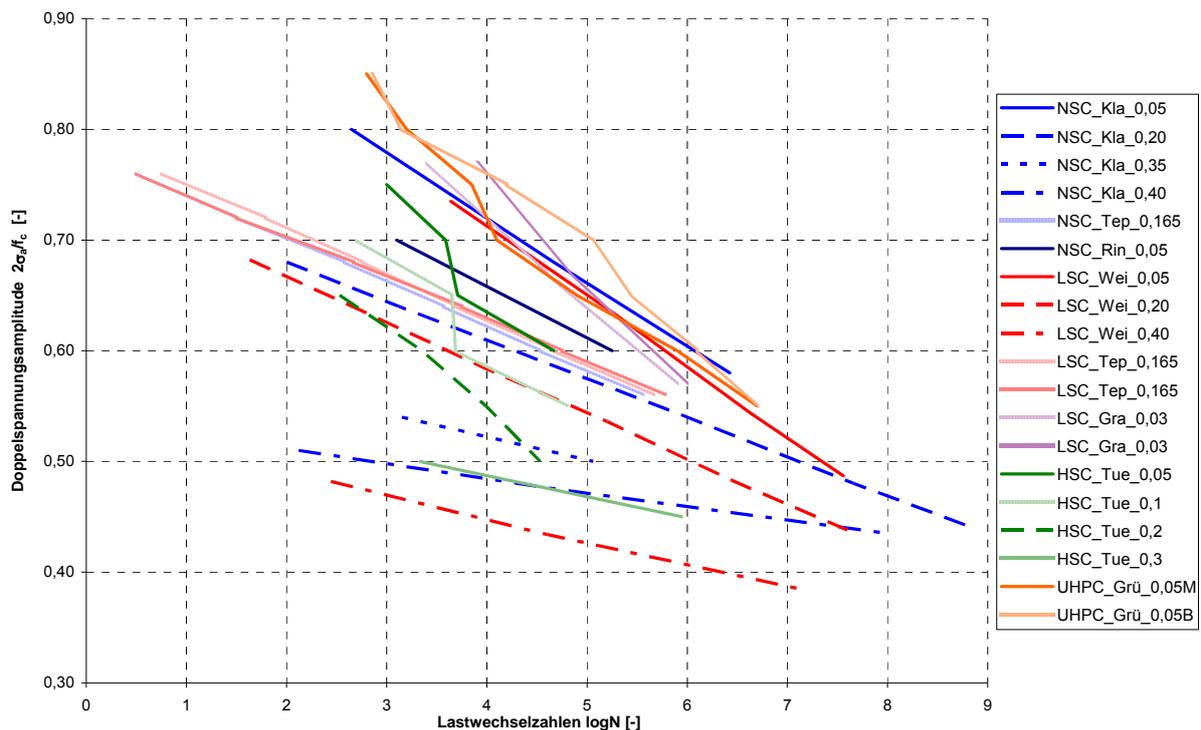


Bild 9.2: Übersicht der bisherigen Ergebnisse aus früheren Versuchen

Im nächsten Bild 9.3 sind die Versuche abgebildet, welche bei einer konstanten Unterspannung von $\sigma_u = 0,05 \cdot f_c$ durchgeführt wurden. Die Ergebnisse der Versuche für den Leichtbeton und den Normalbeton liegen nahe beieinander. Lediglich die Versuche nach (Rings 1986) zeigen geringere Lastwechsel für den Normalbeton auf, obwohl die Mischung an die Rezeptur nach (Klausen 1978) angepasst wurde. Hochfester Beton nach (König et al. 2006) zeigt geringere Lastwechselzahlen als der Normal- und der Leichtbeton. Der ultrahochfeste Beton liegt nahe dem Normalbeton und besitzt bei hohen Doppelspannungsamplituden größere Lastwechselzahlen.

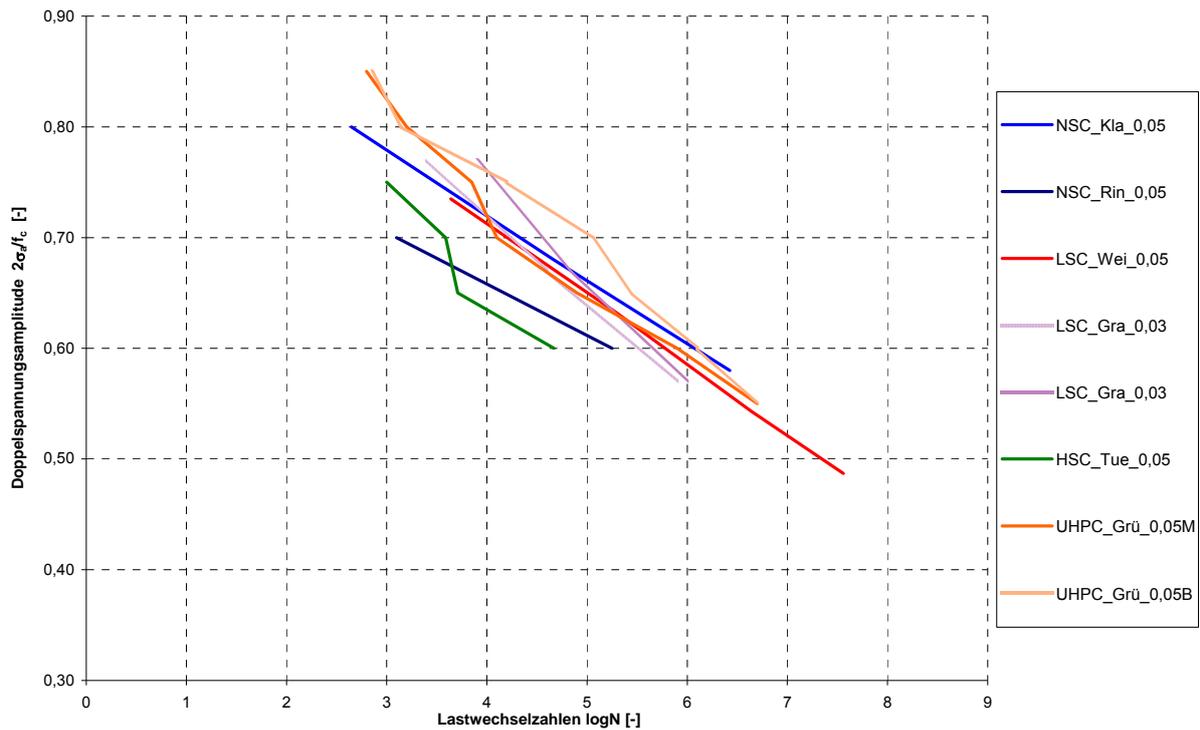


Bild 9.3: Wöhlerlinien für Versuche mit einer Unterspannung von $\sigma_u = 0,05 \cdot f_c$

Das Bild 9.4 stellt die Wöhlerlinien für eine Unterspannung von $\sigma_u = 0,20 \cdot f_c$ dar. Bis auf den hochfesten Beton verhalten sich die Wöhlerlinien der unterschiedlichen Betone ähnlich. Die Betone mit geringerer Unterspannung verhalten sich günstiger und liegen nahe beieinander. Es ist festzustellen, dass der Leichtbeton geringere Lastwechselzahlen erreicht als der Normalbeton.

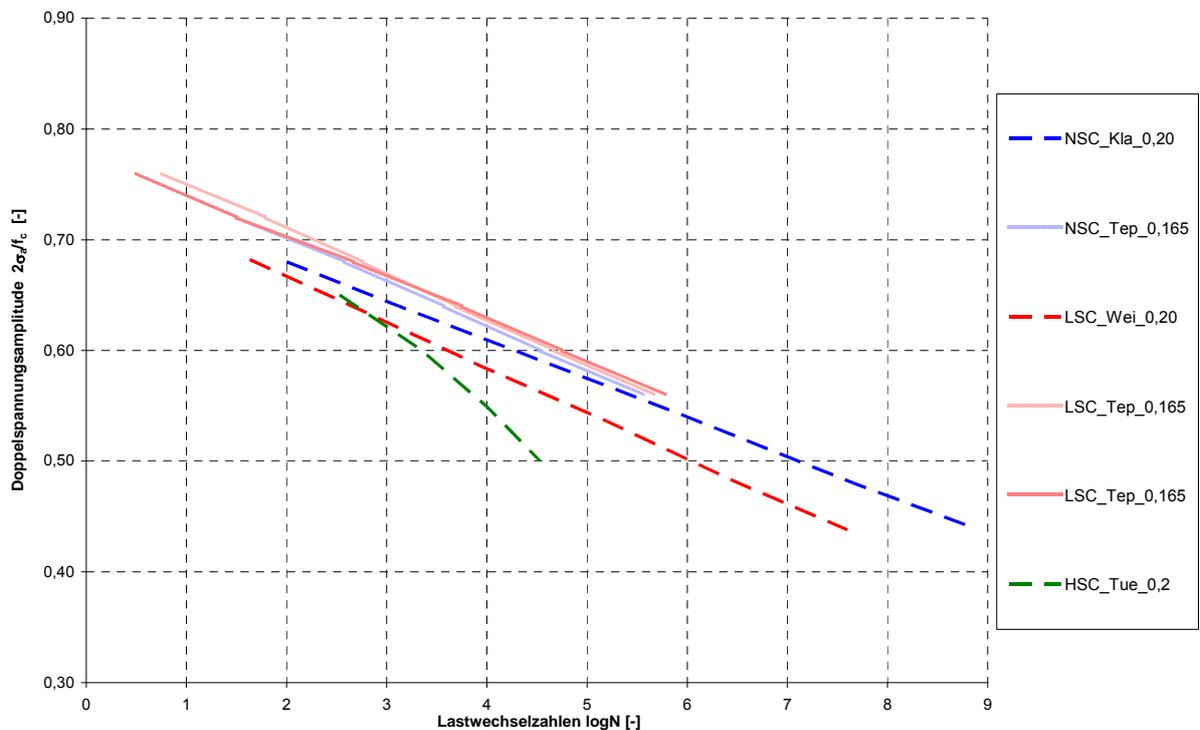


Bild 9.4: Wöhlerlinien für Versuche mit einer Unterspannung von $\sigma_u = 0,20 \cdot f_c$

Das Bild 9.5 stellt die Wöhlerlinien für eine Unterspannung von $\sigma_u = 0,40 \cdot f_c$ dar. Die unterschiedlichen Normalbetone und der hochfeste Beton liegen nahe beieinander. Der Leichtbeton erreicht bei gleichen Spannungen geringere Lastwechselzahlen als der Normalbeton. Der Unterschied wächst je höher die Unterspannung ist.

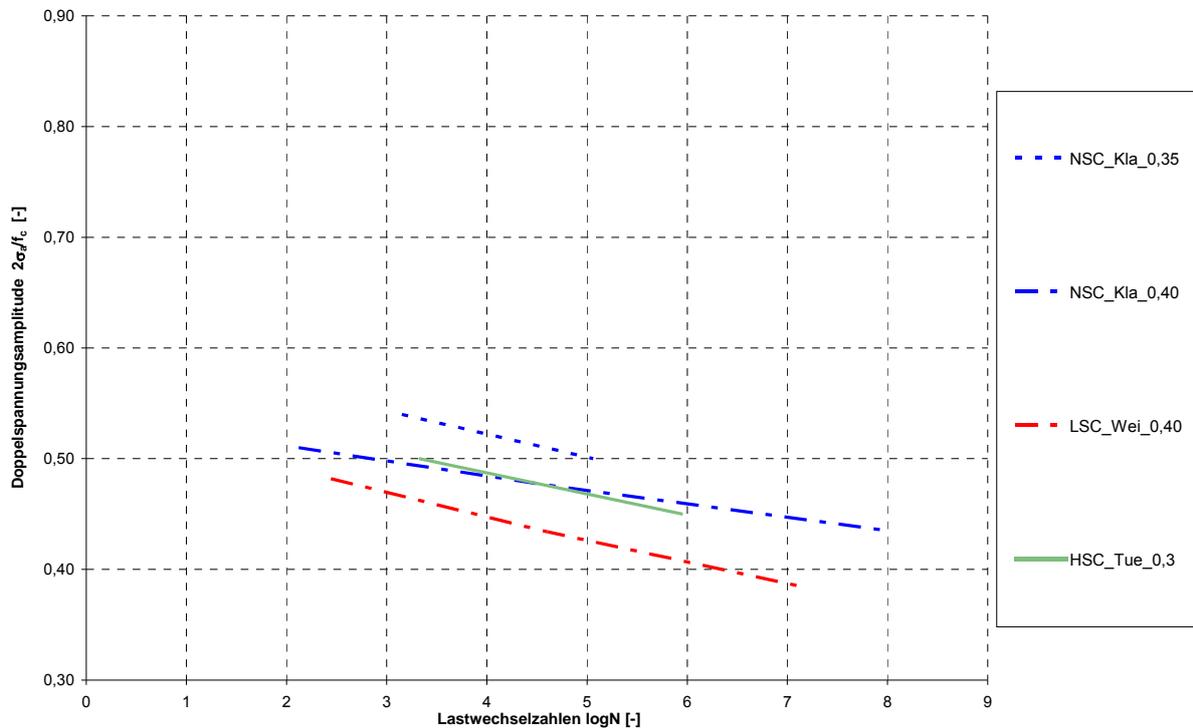


Bild 9.5: Wöhlerlinien für Versuche mit einer Unterspannung von $\sigma_u = 0,40 \cdot f_c$

9.4 Zusammenfassung Leichtbeton

Zusammenfassend kann für den Leichtbeton gesagt werden:

- Es existiert keine ausreichende Anzahl an Ermüdungsversuchen mit Leichtbeton.
- Untersuchungen zum hochfesten Leichtbeton existieren gar nicht.
- Der Einfluss unterschiedlicher Zuschläge ist nicht untersucht.
- Der Einfluss der Rohdichte, der E-Moduln und der Festigkeit ist zu berücksichtigen.
- Die Prüffrequenz hat einen Einfluss auf die Versuche und somit auf die Ergebnisse.
- Es sind unterschiedliche Ergebnisse (Lastwechselzahlen) für den Leichtbeton bei höherer Unterspannung zu erwarten.
- Es ist mit einem beschleunigten Risswachstum ähnlich dem hochfesten bzw. ultrahochfesten Beton zu rechnen.
- Es sind allgemein ähnliche Schädigungsverläufe wie beim ultrahochfesten Beton zu erwarten.

10 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich“ wurde am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München das Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) im Bereich baupraktisch relevanter Beanspruchungen untersucht.

In klassischen kraftgeregelten, einstufigen und einaxialen Wöhlerversuchen mit gleich bleibender sinusförmiger Lastaufbringung wurden die Auswirkungen der nach bisher vorliegenden Erkenntnissen dominanten Einflüsse (Spannungsschwingbreite und Mittelspannung, Faserzusatz, Faserorientierung sowie Wärmebehandlung) auf das Ermüdungsverhalten von UHPC untersucht. Ziel war die Festlegung von Wöhlerlinien auf Grundlage statistischer Auswertungen. Auf der Grundlage der Wöhlerlinien erfolgte die Ableitung von Grenzlinien für definierte Lastwechselzahlen in Form von Goodman-Diagrammen.

Das Versuchsprogramm umfasste insgesamt 215 Ermüdungsversuche an einer feinkörnigen UHPC Mischung (M2Q bzw. M3Q) und einer grobkörnigen UHPC Mischung (B5Q). Zusätzlich zu den Hauptversuchen wurden begleitende Ermüdungsversuche durchgeführt, um Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten zu untersuchen.

Nach der Beschreibung der Problemstellung, dem Ziel und dem Umfang der Arbeit im Abschnitt 1 wird im zweiten Abschnitt der allgemeine Stand der Kenntnisse beschrieben.

Eine ausführliche Beschreibung des Versuchsprogramms, der Betonzusammensetzung und der Prüfkörperabmessungen sind im Abschnitt 3 und 4 enthalten.

Im Abschnitt 5 werden anschließend alle statischen Versuche und deren Ergebnisse beschrieben. Beginnend mit den statischen Druckversuchen, wurden auch Zug-, Biegezug- und E-Modulversuche durchgeführt. Des Weiteren wurde die Festigkeitsentwicklung der Druckfestigkeit der unterschiedlichen UHPC Mischungen in Abhängigkeit der verschiedenen Lagerungsarten untersucht. In einem weiteren Schritt wurden Umrechnungsbeiwerte für die verschiedenen Prüfkörperabmessungen bei statischen Druckversuchen definiert. In Abhängigkeit der UHPC Mischung und der Lagerungsart kann somit zwischen den unterschiedlichen Prüfkörpern die Druckfestigkeit umgerechnet werden. Mit Hilfe der E-Modul Untersuchungen wurde eine neue Gleichung zur Bestimmung des E-Moduls vom UHPC in Abhängigkeit der Druckfestigkeit definiert. Ferner wurden Gleichungen zur Berechnung der zentrischen Zugfestigkeit und Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit der Druckfestigkeit bestimmt.

Der sechste Abschnitt befasste sich mit der Versuchs- und Messeinrichtung.

Aus der Auswertung der Ermüdungsversuche wurden im Abschnitt 7 Wöhlerlinien als Regressionsgeraden der verschiedenen UHPC Mischungen entwickelt. Die Wöhlerlinien bilden im Vergleich zum Normalbeton ein deutlich günstigeres Ermüdungsverhalten ab. Zusätzlich wurden Einflüsse auf die Wöhlerlinien (Faserorientierung, Wärmebehandlung, Luftporen und Belastungsfrequenz etc.) untersucht. Der Einfluss der Faserorientierung auf das Ermüdungsverhalten konnte nicht untersucht werden, da der vermutete Zusammenhang zwischen der Betonierrichtung und der Faserorientierung nicht vorhanden war. Ein geringer Einfluss der Betonierrichtung, der Wärmebehandlung und der vorhandenen Stahlfasern auf das Ermüdungsverhalten des UHPC ist vorhanden.

Ein Einfluss des Luftporengehaltes oder der Belastungsfrequenz auf die Streuung der erreichten Lastwechsel bei den Ermüdungsversuchen konnte allerdings nicht festgestellt werden. Die Streuung der erreichten Lastwechsel ist allein auf die Streuung der Zugfestigkeit zurückzuführen.

Mit Hilfe der ermittelten Wöhlerlinien für die feinkörnige und die grobkörnige UHPC Mischung wurden Dauerfestigkeitsschaubilder nach Goodman erstellt. Mit Hilfe der Goodman-Diagramme wurde festgestellt, dass zum Teil größere Lastwechselzahlen um den Faktor 1000 im Vergleich zum Normalbeton möglich sind.

Bei den Ermüdungsversuchen traten zwei unterschiedliche Versagensarten (Zug- und Druckversagen) auf. Die meisten Ermüdungsversuche versagten auf Zug. Der Wechsel der Versagensart ist dabei von der Druckunterspannung abhängig. Ermüdungsversuche mit einer Unterspannung $\sigma_c/f_{cm} < -0,6$ versagten grundsätzlich auf Druck. Zugversagen trat dagegen nur bei betragsmäßig geringerer Druckspannung auf.

Die Auswertung der Verformungsmessungen konnte bestätigen, dass auch für den UHPC, unabhängig von der UHPC Mischung, der Schädigungsverlauf in die bekannten drei Phasen aufgeteilt werden kann - Rissentstehung (Phase I), stabiler Rissfortschritt (Phase II) und instabiles bzw. progressives Risswachstum (Phase III). Dabei konnte festgestellt werden, dass im Gegensatz zum Normalbeton die Phasen I und III stark verkürzt sind. Die erste Phase umfasst beim UHPC etwa 5% der Lebensdauer (Normalbeton 20%). Der Übergang von der zweiten zur dritten Phase erfolgt bei etwa 95% der Lebensdauer (Normalbeton 80%). Die Neigung der Geraden in der konstanten Phase II ist im Vergleich zum Normalbeton und hochfesten Beton flacher. Die Höhe der Dehnung im ersten Wendepunkt und die Kürze der Phasen I und III sind allein von der Höhe der Druckspannung abhängig. Die Zugspannung beeinflusst lediglich die Steigung der Geraden in der Phase II. Bei geringer Zugspannung fällt die Neigung der Geraden flacher aus. Mit zunehmender Zugspannung ist eine steilere Neigung zu erwarten.

Im Abschnitt 8 wurde das Bemessungsmodell aus (Wefer 2010), welches für Ermüdungsversuche von UHPC im Druckschwellbereich entwickelt wurde, für den Druck-Zug-Wechselbereich erweitert. Die Grundlage des Bemessungsmodells orientiert sich am Ansatz aus dem Model Code 2010 (fib 2010). Beim neu definierten Bemessungsansatz wird in Anlehnung an (fib 2010) vorgeschlagen, die Wöhlerlinien in zwei Bereiche aufzuteilen. In Abhängigkeit der Druckunterspannung und somit den unterschiedlichen Versagensarten stehen nun zwei Gleichungen für die Wöhlerlinien zur Verfügung.

Ein kleiner Überblick über das Ermüdungsverhalten von Leichtbeton im Abschnitt 9 zeigt, dass ähnlich dem ultrahochfesten Beton mit einem beschleunigten Risswachstum zu rechnen ist. Generell sind die Versagensarten dem ultrahochfestem Beton ähnlich, da die Zementmatrix deutlich fester ist als die Festigkeit der Zuschläge.

Aufgrund der eigenen Arbeiten und Erkenntnisse wird festgestellt, dass weiterer Forschungsbedarf notwendig ist. Der vorgeschlagene Bemessungsansatz sollte mit Hilfe von weiteren Ermüdungsversuchen und den daraus folgenden Wöhlerlinien optimiert werden. Des Weiteren sollte versucht werden die Streuung der Zugfestigkeit zu reduzieren, um die Streuung der Lastwechselzahlen bei den Ermüdungsversuchen zu minimieren.

Die UHPC Mischungen sind sehr sensibel und können bei einer kleinen Änderung (Lagerungsart, Zusammensetzung oder Faserart) zu unterschiedlichen Ergebnissen, sowohl in den statischen Versuchen als auch bei den Ermüdungsversuchen, führen. Weitere Ermüdungsversuche sollten mit Hilfe von Referenzmischungen bzw. Referenzversuchen verglichen werden.

11 Literatur

- Acker, P.; Behloul, M. (2004): Ductal Technology: A Large Spectrum of Properties, a Wide Range of Applications. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (Hg.): Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3), S. 11-24.
- AFGC (2002): Betons fibres á ultra-hautes performances (Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes). Recommandations provisoires (Interim Recommendations). Bagneux, France: Association Francaise de Génie Civil.
- Aïtcin, P.-C.; Lachemi, M.; Adeline, R.; Richard, P. (1998): The Sherbrooke Reactive Powder Concrete Footbridge. In: Structural Engineering International, Jg. 8, H. 2, S. 140-144.
- Behloul, M.; Bernier, G.; Cheyrezy, M. (1996): Tensile Behavior of Reactive Powder Concrete (RPC). In: de Larrard, F.; Lacroix, R. (Hg.): Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Mai 29 - 31, 1996. Paris, France: Les Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, S. 1375-1381.
- Betterman, L. R.; Ouyang, C.; Shah, S. P. (1995): Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar. In: Advanced Cement Based Materials, Jg. 2, H. 2, S. 53-61.
- Bonzel, J.; Schmidt, M. (1984): Verteilung und Orientierung von Stahlfasern im Beton und ihr Einfluß auf die Eigenschaften von Stahlfaserbeton. In: beton, Jg. 34, H. 11, S. 463-470.
- Bornemann, R.; Faber, S. (2004): UHPC with steel- and non-corroding high-strength polymer fibres under static and cyclic loading. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (Hg.): Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3), S. 673-682.
- Bornemann, R.; Schmidt, M.; Fehling, E.; Middendorf, B. (2001): Ultra-Hochleistungsbeton UHPC. Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten. In: Beton- und Stahlbetonbau, Jg. 96, H. 7, S. 458-467.
- Brameshuber, W.; Brockmann, T. (2003): Textilbewehrter ultrahochfester Beton. In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F. (Hg.): Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen - Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. 1. Aufl. Berlin: Bauwerk Verl., S. 153-164.
- Brosge, S. (2001): Beitrag zur Ermüdungsfestigkeit von hochfestem Beton. Dissertation. Leipzig. Universität Leipzig, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät.
- Buba, R. (2004): Zur stochastischen Zuverlässigkeit bestehender Spannbetonbrücken gegen Ermüdung. Dissertation. München. Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau - Institut für Baustoffe und Konstruktion.
- Buxmann, O.; Grubisic, V.; Huth, H.; Schütz, D. (1992): Betriebsfestigkeit. Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile. 2., erw. Aufl. Düsseldorf: Verl. Stahleisen.
- Carpinteri, A.; Ferro, G. (1994): Size effects on tensile fracture properties: a unified explanation based on disorder and fractality of concrete microstructure. In: Materials and Structures, Jg. 27, H. 10, S. 563-571.
- CEB-FIP (1988): Fatigue of Concrete Structures. State-of-the-Art Report. Lausanne: Construction Press (Bulletin d'information / Comité euro international du béton, Fédération internationale de la précontrainte, 188).
- CEB-FIP (1993): Model Code 1990. Design Code. London: Telford (Bulletin d'information / Comité euro international du béton, Fédération internationale de la précontrainte, 213/214).
- CEB-FIP (1995): High performance concrete. Recommended extensions to the Model Code 90 - Research Needs. Lausanne: Construction Press (Bulletin d'information / Comité euro international du béton, Fédération internationale de la précontrainte, 228).
- Cornelissen, H. A. W. (1984): Constant-amplitude tests on plain concrete in uniaxial tension and tension-compression. Report 5-84-1. Department of Civil Engineering; Delft University of Technology.
- Cornelissen, H. A. W.; Reinhardt, H. W. (1984): Uniaxial tensile fatigue failure of concrete under constant-amplitude and programme loading. In: Magazine of Concrete Research, Jg. 36, H. 129, S. 216-226.

- Cornelissen, H. A. W.; Timmers, G. (1981): Fatigue of plain concrete in uniaxial tension and in alternating tension-compression. Experiments and Results. Report 5-81-7. Department of Civil Engineering; Delft University of Technology.
- DAfStb (1975): Dauerschwell- und Betriebsfestigkeit von Konstruktions- Leichtbeton. Unter Mitarbeit von H. Weigler und W. Freitag. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 247).
- DAfStb (1983): Dynamische Probleme im Stahlbetonbau. Teil 1 Der Baustoff Stahlbeton unter dynamischer Beanspruchung. Unter Mitarbeit von F. P. Müller, E. Keintzel und H. Charlier. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 342).
- DAfStb (1987): Unbewehrter und bewehrter Beton unter Wechselbeanspruchung. Unter Mitarbeit von H. Weigler und K.-H. Rings. Berlin: Ernst & Sohn (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 383).
- DAfStb (1991): Bruchmechanisches Verhalten von Beton unter monotoner und zyklischer Zugbeanspruchung. Unter Mitarbeit von H. Duda. Berlin: Beuth Verlag (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 419).
- DAfStb (1994a): Ermüdungsfestigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen mit Erläuterungen zu den Nachweisen gemäß CEB-FIP Model Code 1990. Unter Mitarbeit von G. König und I. Danilewicz. Berlin: Beuth Verlag (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 439).
- DAfStb (1994b): Zum Zug- und Schubtragverhalten von Bauteilen aus hochfestem Beton. Unter Mitarbeit von G. Rimmel. Berlin: Beuth Verlag (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 444).
- DAfStb (1999): Tragverhalten von Stahlfaserbeton. Unter Mitarbeit von Y.-Z. Lin. Berlin: Beuth Verlag (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 494).
- DAfStb (2003a): Das Ermüdungsverhalten von Dübelbefestigungen. Unter Mitarbeit von K. Block und F. Dreier. Berlin: Beuth Verlag (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 541).
- DAfStb (2003b): Hochfester Beton unter Dauerzuglast. Unter Mitarbeit von T. Rinder. Berlin: Beuth Verlag (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 544).
- DAfStb (2007): Sachstandbericht Ultrahochfester Beton. Dokument DAfStb UA UHFB N 67. Unter Mitarbeit von M. Schmidt. Berlin: Beuth Verlag (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 561).
- DAfStb (2009): DAfStb- Richtlinie Stahlfaserbeton. Ergänzung zu DIN 1045, Teile 1 bis 4 (08/2008). Berlin: Beuth Verlag.
- de Antrim, J. C.; McLaughlin, J. F. (1959): Fatigue Study of Air-Entrained Concrete. In: Journal of the American Concrete Institute, Jg. 55, H. 5, S. 1173-1182.
- de Larrard, F.; Sedran, T. (1994): Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the use of a packing model. In: Cement and Concrete Research, Jg. 24, H. 6, S. 997-1009.
- DIN EN 1992-1-1, 2005-10-00: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2005 inkl. Berichtigungen Ber1:2008 (E) und Ber2:2010 (E).
- DIN EN 196-1, 2005-05-00: Prüfverfahren für Zement. Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:2005.
- DIN EN 12350-7, 2009-08-00: Prüfung von Frischbeton. Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren; Deutsche Fassung EN 12350-7:2009.
- DIN 1045-1, 2008-08-00: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Ausgabe 08.2008.
- DIN FB 101, 2009-03-00: DIN-Fachbericht 101 - Einwirkungen auf Brücken, Ausgabe 03.2009.
- DIN FB 102, 2009-03-00: DIN-Fachbericht 102 - Betonbrücken, Ausgabe 03.2009.
- Dugat, J.; Roux, N.; Bernier, G. (1996): Mechanical properties of reactive powder concretes. In: Materials and Structures, Jg. 29, H. 4, S. 233-240.
- Erdem, E. (2002): Probabilistisch basierte Auslegung stahlfasermodifizierter Betonbauteile auf experimenteller Grundlage. Dissertation. Bochum. Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bauingenieurwesen.
- EuroLightCon (2000): Fatigue of normal weight concrete and lightweight concrete. Document BE96-3942/R34. Norway: SINTEF.
- Faust, T. (2003): Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Ernst & Sohn (Bauingenieur-Praxis).

- Fehling, E.; Bunje, K. (2003): Bemessung für Biegung und Querkraft bei Bauteilen aus UHFB. In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F. (Hg.): Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen - Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. 1. Aufl. Berlin: Bauwerk Verl., S. 183-198.
- Fehling, E.; Bunje, K.; Leutbecher, T. (2004a): Design relevant properties of hardened Ultra High Performance Concrete. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (Hg.): Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3), S. 327-338.
- Fehling, E.; Leutbecher, T. (2005): Ultra High Performance Concrete (UHPC). A challenge for structural design. In: Balazs, G. L.; Borosnyoi, A. (Hg.): Proceedings of the fib Symposium - Keep Concrete Attractive, May 22 - 25, 2005. Budapest, Hungary .
- Fehling, E.; Schmidt, M.; Teichmann, T.; Bunje, K.; Bornemann, R.; Middendorf, B. (2005): Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht DFG FE 497/1-1. Kassel: Kassel Univ. Press.
- Fehling, E.; Schreiber, W.; Bunje, K.; Schmidt, M. (2004b): Brücke aus Ultrahochfestem Beton in Kassel über die Fulda. In: Bauingenieur, Jg. 79, H. 7/8, S. 350-352.
- fib (2010): Model Code 2010. First complete draft - Vol 01 & 02. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (Bulletin / International Federation for Structural Concrete Draft model code, 55 & 56).
- Fürst, A. (2001): Vorgespannte Betonzugglieder im Brückenbau. Dissertation. Zürich. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion.
- Fürst, A.; Marti, P. (1999): Versuche an Trägern mit Unterspannung aus vorfabrizierten, vorgespannten Betonzuggliedern. Basel: Birkhäuser (IBK Bericht, Nr. 243).
- Gray, W. H.; McLaughlin, J. F.; Antrim, J. D. (1961): Fatigue Properties of lightweight aggregate concrete. In: Journal of the American Concrete Institute, S. 149-163.
- Grünberg, J.; Lohaus, L.; Ertel, C.; Wefer, M. (2007): Mehraxiales mechanisches Ermüdungsmodell von Ultrahochfestem Beton. Experimentelle und analytische Untersuchungen. In: Beton- und Stahlbetonbau, Jg. 102, H. 6, S. 388-398.
- Gylltoft, K. (1984): A fracture mechanics model for fatigue in concrete. In: Materials and Structures, Jg. 17, H. 1, S. 55-58.
- Habel, K.; Denarié, E.; Brühwiler, E. (2005): Bauteile aus ultrahochfestem Faserbeton (UHPFRC) und traditionellem Stahlbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau, Jg. 100, H. 2, S. 124-131.
- Haibach, E. (2006): Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. 3. korrigierte und erg. Aufl. Berlin: Springer.
- Hajar, Z.; Lecointre, D.; Simon, A.; Petitjean, J. (2004): Design and Construction of the world first Ultra-High Performance Concrete road bridges. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (Hg.): Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3), S. 39-48.
- Hegger, J.; Görtz, S.; Beutel, R.; König, G.; Schenck, G.; Kliver, J. et al. (1999): Überprüfung und Vereinheitlichung der Bemessungsansätze für querkraftbeanspruchte Stahlbeton- und Spannbetonbauteile aus normalfesten und hochfesten Beton nach DIN 1045-1. Abschlußbericht DIBt - Forschungsvorhabens IV 1-5-876 / 98: RWTH Aachen, Universität Leipzig, TU München, Universität Stuttgart.
- Heinhold, J.; Gaede, K.-W. (1979): Ingenieur-Statistik. 4., verb. u. wesentl. erw. Aufl. München: Oldenbourg.
- Hillerborg, A.; Modéer, M.; Petersson, P.-E. (1976): Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. In: Cement and Concrete Research, Jg. 6, H. 6, S. 773-781.
- Hilsdorf, H. K.; Kesler, C. E. (1966): Fatigue strength of concrete under varying flexural stresses. In: ACI Materials Journal, Jg. 63, H. 10, S. 1059-1075.
- Hohberg, R. (2004): Zum Ermüdungsverhalten von Beton. Dissertation. Berlin. Technische Universität Berlin, Fakultät VI - Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften.
- Holmen, J. O. (1979): Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading. Division of Concrete Structures, The Norwegian Institute of Technology, the University of Trondheim, Norway. Trondheim, Norway. (Bulletin No. 79-1).

- Holmen, J. O. (1984): Fatigue design evaluation of offshore concrete structures. In: *Materials and Structures*, Jg. 17, H. 1, S. 39-42.
- Holschemacher, K.; Weiße, D.; Klotz, S. (2004): Bond of Reinforcement in Ultra High Strength Concrete. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (Hg.): *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3), S. 375-387.
- Hordijk, D. A. (1991): Local approach to fatigue of concrete. Dissertation. Delft. Delft University of Technology, Division of Mechanics and Structures.
- Hordijk, D. A.; Wolsink, G. M.; de Vries, J. (1995): Fracture and fatigue behaviour of a high strength limestone concrete as compared to gravel concrete. Delft: Heron (Vol. 40, No. 2).
- Hughes, B. P.; Chapman, G. P. (1966): The deformation of concrete and microconcrete in compression and tension with particular reference to aggregate size. In: *Magazine of Concrete Research*, Jg. 18, H. 54, S. 19-24.
- Jovanovic, I.; Paatsch, A.; Durukal, A. (2002): Ductal: a new generation of ultra high performance fiber reinforced concrete. In: König, G.; Dehn, F.; Faust, T. (Hg.): *Proceedings of the 6th international Symposium on Utilization of High Strength / High Performance Concrete*, June 16 - 20, 2002. Leipzig: Institute of Structural Concrete and Building Materials, University of Leipzig, S. 1089-1095.
- Jungwirth, J.; Muttoni, A. (2004): Structural Behavior of Tension Members in UHPC. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (Hg.): *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3), S. 533-544.
- Kaptijn, N.; Blom, J. (2004): A new bridge deck for the Kaag bridges. The first CRC (Compact Reinforced Composite) application in civil infrastructure. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (Hg.): *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3), S. 49-57.
- Kessler-Kramer, C. (2002): Zugtragverhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung. Dissertation. Karlsruhe. Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- Kim, J.-K.; Kim, Y.-Y. (1999): Fatigue crack growth of high-strength concrete in wedge-splitting test. In: *Cement and Concrete Research*, Jg. 29, H. 5, S. 705-712.
- Klausen, D. (1978): Festigkeit und Schädigung von Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung. Dissertation. Darmstadt. Technische Hochschule Darmstadt, Fachbereich Konstruktiver Ingenieurbau.
- Klausen, D.; Weigler, H. (1979): Betonfestigkeit bei konstanter und veränderlicher Dauerschwellbeanspruchung. In: *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, H. 3, S. 158-163.
- König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F. (Hg.) (2003a): *Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen - Beiträge aus Praxis und Wissenschaft*. 1. Aufl. Berlin: Bauwerk Verl.
- König, G.; Schneider, H.; Dehn, F.; Schmidt, D.; Wagner, J.-P. (2003b): Verbundkonstruktionen mit ultrahochfestem Beton für den Brücken- und Hochbau. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 98, H. 4, S. 240-246.
- König, G.; Tue, N. V.; Mucha, S.; Wille, K. (2006): Festigkeit von Hochleistungsbeton bei häufiger wiederholter Beanspruchung (Ermüdung). Abschlussbericht DFG KO 362/61-1.
- König, G.; Tue, N. V.; Zink, M. (2001): *Hochleistungsbeton. Bemessung, Herstellung und Anwendung*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Kützing, L. (2000): Tragfähigkeitsermittlung stahlfaserverstärkter Betone. Dissertation. Leipzig. Universität Leipzig, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät.
- Lambotte, H.; Taerwe, L. (1987): Fatigue of plain high strength concrete subjectet to flexural tensile stresses. In: Holand, I.; Helland, S.; Jakobsen, B.; Lenschow, R. (Hg.): *Proceedings of the 1st International Symposium on Utilization of High Strength Concrete*, June 15 - 18, 1987. Stavanger, Norway: TAPIR, S. 331-342.
- Lappa, E. S.; Braam, C. R.; Walraven, J. C. (2004): Static and fatigue bending tests of UHPC. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (Hg.): *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3), S. 449-458.

- Lin, Y.-Z. (1996): Tragverhalten von Stahlfaserbeton. Dissertation. Karlsruhe. Universität Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie.
- Lindlbauer, W. (2000): Brücken mit Hochleistungsbeton ohne Abdichtung - Planung und konstruktive Durchbildung. In: Zement und Beton, H. 2, S. 18-21.
- Lusche, M. (1971): Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Dissertation. Bochum. Ruhr-Universität Bochum, Abt. für Maschinenbau und Konstruktiven Ingenieurbau.
- Maeder, U.; Lallement-Gamboa, I.; Chaignon, J.; Lombard, J.-P. (2004): Ceracem, a new high performance concrete: characterisations and applications. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (Hg.): Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3), S. 59-68.
- Markovic, I. (2006): High-Performance Hybride-Fibre Concrete. Development and Utilisation. Dissertation. Delft. Technische Universität Delft.
- McCall, J. (1958): Probability of fatigue failure of plain concrete. In: Journal of the American Concrete Institute, Jg. 55, H. 2, S. 233-244.
- Miner, M. A. (1945): Cumulative Damage in Fatigue. In: Journal of Applied Mechanics, Jg. 12, S. 159-164.
- Mühlbauer, C.; Zilch, K. (2007): Joining of Ultra High Performance Concrete (UHPC) Members by Gluing. In: Zingoni, A. (Hg.): Proceedings of the Third International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, 10 - 12 September 2007, Cape Town, South Africa. Rotterdam: Millpress, S. 1471-1476.
- Müller, H. S.; Burkart, I. (2007): Materialgesetze für das Spannungs-Dehnungs-Zeitverhalten von ultrahochfestem Beton. Arbeitsbericht 1. FP DFG MU 1368/9-1. Karlsruhe.
- Müller, H. S.; Burkart, I. (2009): Materialgesetze für das Spannungs-Dehnungs-Zeitverhalten von ultrahochfestem Beton. Arbeitsbericht 2. FP DFG MU 1368/9-2. Karlsruhe.
- Murdock, J. W.; Kesler, C. E. (1960): The mechanism of fatigue failure in concrete. College of Engineering, University of Illinois. Illinois, USA. (T. & A. M. Report, No. 587).
- Muttoni, A. (2003): Innovationen im Brückenbau am Beispiel der unterspannten Tragwerke. In: Graubner, C.-A.; Garg, A. (Hg.): Tagungsband zum Internationalen Brückenbausymposium, Oktober 01 - 02, 2003. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Massivbau, S. Artikel XVI.
- Naaman, A. E.; Homrich, J. R. (1989): Tensile stress-strain properties of SIFCON. In: ACI Materials Journal, Jg. 86, H. 3, S. 244-251.
- Orgass, M.; Klug, Y. (2004): Fibre Reinforced Ultra-High Strength Concretes. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (Hg.): Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3), S. 637-647.
- Palmgren, A. (1945): Die Lebensdauer von Kugellagern. In: VDI- Zeitschrift, Jg. 68, H. 14, S. 339-341.
- Paris, P.; Erdogan, F. (1963): A critical analysis of crack propagation laws. In: Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, Jg. 85, H. 4, S. 528-534.
- Pöllath, M. (2009): Ermittlung von Umrechnungsfaktoren für die Festigkeit von Prüfkörpern aus Ultrahochfestem Beton (UHPC). Bachelorarbeit. München. Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau.
- Rackwitz, R.; Zilch, K. (2002): Zuverlässigkeit von Tragwerken. In: Zilch, K.; Diederichs, C. J.; Katzenbach, R. (Hg.): Handbuch für Bauingenieure. Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit - Fachwissen in einer Hand. Berlin: Springer, S. 1.217-1.252.
- Reichel, D. (2004): Anwendungen von UHPC für Brückfertigteile. In: Dehn, F.; Holschemacher, K.; Tue, N. V. (Hg.): Neue Entwicklungen im Brückenbau. Innovationen im Bauwesen. Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. 1. Aufl. Berlin: Bauwerk Verlag GmbH, S. 185-197.
- Reineck, K.-H.; Greiner, S.; Lichtenfels, A. (2003): Wasserspeicher aus UHFB - Bemessung. In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F. (Hg.): Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen - Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. 1. Aufl. Berlin: Bauwerk Verl., S. 257-268.
- Reineck, K.-H.; Kuchma, D. A.; Fitik, B. (2005): Erweiterte Datenbanken zur Überprüfung der Querkraftbemessung für Konstruktionsbauteile mit und ohne Bügel. Abschlussbericht des DAFStb Forschungsvorhabens V423. Universität Stuttgart, University of Illinois.

- Reinhardt, H.-W.; Jooß, M. (2003): Wasserspeicher aus UHFB - Technologie. In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F. (Hg.): Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen - Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. 1. Aufl. Berlin: Bauwerk Verl., S. 239-255.
- Richard, P. (1996): Reactive powder concrete: a new ultra-high-strength cementitious material. In: de Larrard, F.; Lacroix, R. (Hg.): Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Mai 29 - 31, 1996. Paris, France: Les Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées .
- Richard, P.; Cheyrezy, M. (1995): Composition of reactive powder concretes. In: Cement and Concrete Research, Jg. 25, H. 7, S. 1501-1511.
- RILEM (1984): Long term random dynamic loading of concrete structures. Report by RILEM Committee 36-RDL. In: Materials and Structures, Jg. 17, H. 1, S. 1-28.
- Rings, K.-H. (1986): Unbewehrter und bewehrter Beton unter häufiger wiederholter Wechselbeanspruchung. Dissertation. Darmstadt. Technische Hochschule Darmstadt, Fachbereich Konstruktiver Ingenieurbau.
- Rosenbusch, J. (2004): Einfluß der Faserorientierung auf die Beanspruchbarkeit von Bauteilen aus Stahlfaserbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau, Jg. 99, H. 5, S. 372-377.
- Rüsch, H.; Hilsdorf, H. K. (1963): Verformungseigenschaften von Beton unter zentrischen Zugspannungen. Teil I - Voruntersuchungen. Bericht Nr. 44. München. Technische Hochschule München, Materialprüfungsamt für das Bauwesen.
- Saito, M. (1984): Tensile fatigue strength of lightweight concrete. In: The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Jg. 6, H. 3, S. 143-149.
- Schachinger, A. I.; Schmidt, K.; Heinz, D.; Schießl, P. (2002): Early-Age Cracking Risk and Relaxation by Restrained Autogenous Deformation of Ultra High Performance Concrete. In: König, G.; Dehn, F.; Faust, T. (Hg.): Proceedings of the 6th international Symposium on Utilization of High Strength / High Performance Concrete, June 16 - 20, 2002. Leipzig: Institute of Structural Concrete and Building Materials, University of Leipzig, S. 1341-1354.
- Schläfli, M. (1999): Ermüdung von Brückenfahrbahnplatten aus Stahlbeton. Dissertation. Lausanne. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de génie civil.
- Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (Hg.) (2004): Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3).
- Schmidt-Hurtienne, B. (2000): Ein dreiaxiales Schädigungsmodell für Beton unter Einschluß des Dehnrateneffekts bei Hochgeschwindigkeitsbelastung. Dissertation. Karlsruhe. Universität Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie.
- Schneider, A. (2008): Auswertung der Stahlfaserorientierung von Versuchskörpern aus Ultrahochfestem Beton. Bachelorarbeit. München. Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau.
- Schneider, U.; Horvath, J.; König, G.; Dehn, F. (2001): Materialverhalten von ultrahochfesten Betonen (UHPC). In: Beton- und Stahlbetonbau, Jg. 96, H. 7, S. 468-477.
- Schönlin, K. (1988): Ermittlung der Orientierung, Menge und Verteilung der Fasern in faserbewehrtem Beton. In: Beton- und Stahlbetonbau, Jg. 83, H. 6, S. 167-171.
- Schütz, W. (1976): Lebensdauer- Berechnung bei Beanspruchungen mit beliebigen Last-Zeit-Funktionen. In: VDI- Berichte, H. 268, S. 113-138.
- Shi, X. P.; Fwa, T. F.; Tan, S. A. (1993): Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete. In: ACI Materials Journal, Jg. 90, H. 5, S. 435-440.
- Sonoda, K.; Horikawa, T. (1982): Fatigue strength of reinforced concrete slabs under moving loads. In: Badoux, J.-C. (Hg.): Proceedings of the IABSE Colloquium on Fatigue of Steel and Concrete Structures, Lausanne 1982. IABSE Reports Volume 37. Zürich: IABSE, S. 455-462.
- Spitra, F. (2006): Einfluss der Betonzugfestigkeit auf die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Dissertation. München. Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau - Institut für Baustoffe und Konstruktion.
- Tawfiq, K.; Amaghani, J.; Ruiz, R. (1999): Fatigue Cracking of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. In: ACI Materials Journal, Jg. 96, H. 2, S. 226-233.
- Tecusan, C. R. (2009): Untersuchung des Maßstabeffektes an Probekörpern aus Ultrahochfestem Beton (UHPC). Bachelorarbeit. München. Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau.

- Tepfers, R. (1982): Fatigue of Plain Concrete Subjected to Stress Reversals. In: Shah, S. P. (Hg.): Fatigue of Concrete Structures. Detroit, USA: ACI Symposium Publication 75, S. 195-216.
- Tepfers, R.; Kutti, T. (1979): Fatigue strength of plain, ordinary, and lightweight concrete. In: ACI Journal, Jg. 76, H. 5, S. 635-653.
- Teutsch, M.; Grunert, J. (2004): Bending design of steel-fibre-strengthened UHPC. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (Hg.): Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3), S. 523-532.
- Tue, N. V.; Schneider, H. (2003): Hybride Konstruktionen mit UHFB. In: König, G.; Holschemacher, K.; Dehn, F. (Hg.): Ultrahochfester Beton. Innovationen im Bauwesen - Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. 1. Aufl. Berlin: Bauwerk Verl., S. 227-238.
- Waagaard, K. (1981): Fatigue strength of offshore concrete structures. COSMAR report PP2-1 and PP2-2.
- Waagaard, K. (1986): Experimental investigations on the fatigue strength of offshore concrete structures. Proc. SINTEF mini seminar on fatigue of concrete, report no. STF65A86082.
- Walraven, J. C. (2004): Designing with ultra high strength concrete: basics, potential and perspectives. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C. (Hg.): Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), September 13 - 15, 2004. Kassel: Univ. Press (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 3), S. 853-864.
- Wefer, M. (2010): Materialverhalten und Bemessungswerte von ultrahochfestem Beton unter einaxialer Ermüdungsbeanspruchung. Dissertation. Hannover: Leibniz Univ. Hannover Inst. für Baustoffe (Berichte aus dem Institut für Baustoffe, 7).
- Weigler, H.; Klausen, D. (1979): Ermüdungsverhalten von Beton. Auswirkung einer Beanspruchung im Dauerfestigkeitsbereich. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik, H. 4, S. 214-220.
- Wilrich, P.-T.; Henning, H.-J. (1998): Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik. 3., völlig neu bearb. Aufl., korrigierter Nachdr. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hongkong, London, Mailand, Paris, Santa Clara, Singapur, Tokio: Springer.
- Wittmann, F. H. (1983): Fracture mechanics of concrete. Amsterdam: Elsevier.
- Yankelevsky, D. Z.; Reinhardt, H. W. (1989): Uniaxial Behavior of Concrete in Cyclic Tension. In: Journal of Structural Engineering, Jg. 115, H. 1, S. 166-182.
- Zhang, B.; Phillips, D.; Wu, K. (1996): Effects of loading frequency and stress reversal on fatigue life of plain concrete. In: Magazine of Concrete Research, Jg. 48, H. 6, S. 361-375.
- Zilch, K.; Borchert, K. (2005): Tastversuche zur Verklebung von Ultrahochfestem Beton mit Epoxidharzen. Unveröffentlichter Forschungsbericht. Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München.
- Zilch, K.; Mühlbauer, C. (2007): Zum Fügen von Ultra-Hochfestem Beton (UHPC) durch Verkleben. Grundlegende Untersuchungen. In: VDI-Gesellschaft Bautechnik (Hg.): Bauen mit innovativen Werkstoffen. Tagung Leonberg, 19. und 20. März 2007. Düsseldorf: VDI-Verlag (VDI-Berichte, 1970), S. 37-46.
- Zilch, K.; Müller, A. J. (2004): Experimentelle Untersuchung zum Ermüdungstragverhalten von unbewehrten Schubfugen an nachträglich ergänzten Betonbauteilen. Abschlussbericht zum DAFStb-Forschungsvorhaben V 422. Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau.
- Zilch, K.; Zehetmaier, G. M. (2010): Bemessung im konstruktiven Betonbau. Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2). 2., neu bearb. u. erw. Aufl. Heidelberg Neckar: Springer Berlin.
- Zilch, K.; Zehetmaier, G. M.; Gläser, C. (2004): Ermüdungsnachweis bei Massivbrücken. In: Betonkalender, S. 311-406.

12 Anlagen

12.1 Ergebnisse der Druckversuche für die Festigkeitsentwicklung

Tabelle 12.1: Ergebnisse der Druckversuche an Würfeln ($a = 100 \text{ mm}$) für die Festigkeitsentwicklung der Mischungen M2Q, M3Q und B5Q

	d	$f_{cm,cu100}$	s_x	v_x	f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}
	-	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
M2Q oSF mWB (OF)	1	81,5	2,8	3,38	78,7	84,2	81,6
	2	180,6	7,2	3,98	181,2	173,2	187,5
	3	182,9	6,7	3,67	190,4	180,7	177,5
	7	214,1	6,0	2,80	216,4	207,3	218,5
	14	218,9	4,6	2,12	218,8	214,3	223,6
	28	218,1	3,4	1,57	214,7	218,1	221,5
	57	219,3	6,8	3,08	216,6	227,0	214,3
	90	217,2	1,0	0,45	217,2	216,2	218,1
M2Q mSF oWB (WB)	1	102,3	3,7	3,64	106,6	100,3	100,0
	2	114,4	0,9	0,79	115,3	114,4	113,5
	3	125,4	4,6	3,63	129,9	125,5	120,8
	7	143,3	6,9	4,78	141,6	150,8	137,4
	14	156,7	1,5	0,93	157,9	157,2	155,1
	28	175,7	3,0	1,68	174,2	179,1	173,8
	56	189,8	2,3	1,21	192,0	189,9	187,4
	84	192,3	6,1	3,17	199,0	187,1	190,8
M2Q mSF mWB (HV)	1	83,8	0,3	0,37	83,6	83,8	84,2
	2	206,8	3,2	1,54	205,0	204,9	210,5
	3	213,7	1,7	0,81	215,0	214,4	211,7
	7	223,2	1,5	0,65	223,5	224,5	221,6
	14	221,3	2,5	1,12	221,9	223,4	218,5
	28	220,7	5,6	2,54	215,3	226,5	220,3
	56	222,2	3,5	1,60	218,1	224,2	224,3
	90	226,6	3,7	1,64	228,1	222,3	229,3

	d	$f_{cm,cu100}$	s_x	v_x	f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}
	-	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
M3Q mSF mWB (MHV)	1	79,4	3,5	4,38	77,8	83,4	77,0
	2	186,2	3,5	1,88	187,0	189,2	182,3
	3	196,6	14,8	7,55	179,5	204,9	205,5
	7	199,8	5,3	2,65	203,0	202,7	193,7
	14	203,4	10,0	4,93	192,3	205,9	211,9
	28	198,3	0,9	0,47	199,4	197,8	197,8
	56	208,6	3,4	1,65	207,1	212,5	206,2
	91	195,9	3,2	1,64	193,2	195,1	199,5
B5Q mSF mWB (BHV)	1	71,1	1,8	2,51	72,9	70,9	69,4
	2	187,9	0,3	0,13	188,2	187,9	187,7
	3	211,0	0,9	0,45	212,1	210,6	210,3
	7	214,7	3,6	1,66	218,7	213,4	211,9
	14	212,8	4,8	2,28	218,2	211,1	209,0
	28	214,3	4,2	1,96	213,6	210,5	218,8
	56	205,5	1,8	0,90	207,5	205,1	203,9
	91	210,1	2,0	0,96	212,3	208,4	209,6

12.2 Ergebnisse der statischen Versuche (Druckfestigkeiten, Zugfestigkeiten und Biegezugfestigkeiten) für alle Mischungen

12.2.1 M2Q oSF mWB (Serie OF)

Tabelle 12.2: Ergebnisse der statischen Versuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q oSF mWB (Serie OF)

Druckfestigkeiten											Zugfestigkeiten										Biegezugfestigkeiten								
PK	d	f _{c1}	f _{c2}	f _{c3}	f _{c4}	f _{c5}	f _{c6}	f _{cm}	S _x	V _x	PK	d	f _{ct1}	f _{ct2}	f _{ct3}	f _{ct4}	f _{ct5}	f _{ct6}	f _{ctm}	S _x	V _x	PK	d	f _{ct,fl1}	f _{ct,fl2}	f _{ct,fl3}	f _{ctm,fl}	S _x	V _x
-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
cy1100	42	201,3	192,1					196,7	6,5	3,31	kK	31	10,56	11,79	12,00				11,45	0,78	6,79	pr	31	20,32	21,22	17,94	19,83	1,69	8,55
pr40	31	184,5	187,9	200,8	193,1	195,1	191,3	192,1	5,7	2,95	gK	31	9,43	9,11	8,21	7,61			8,59	0,83	9,70								
cy1100	59	212,2	204,9	210,0				209,1	3,7	1,79	kK	59	12,61	14,09	14,36				13,69	0,94	6,88	pr	59	21,59	24,36	22,81	22,92	1,39	6,06
pr40	59	202,6	193,1	199,1	219,0	202,9	210,1	204,4	9,0	4,41																			
cy1100	78	208,7	206,5	203,1				206,1	2,8	1,38	kK	78	13,80	11,23	12,37				12,47	1,29	10,35	pr	78	20,47	19,22	20,18	19,96	0,65	3,27
pr40	78	198,0	200,9	201,8	212,4	215,2	201,6	205,0	7,0	3,43																			
cy1100	133	206,9	199,9	197,4				201,4	4,9	2,46	kK	133	13,58	11,11	10,53				11,74	1,62	13,81	pr	133	19,50	21,14	20,63	20,42	0,84	4,12
pr40	133	195,1	194,1	194,3	202,4	185,8	187,4	193,2	6,0	3,11																			
Mittelwerte der Druckfestigkeiten											Mittelwerte der Zugfestigkeiten										Mittelwerte der Biegezugfestigkeiten								
cy1100								203,9	5,9	2,91	kK								12,34	1,37	11,07								
pr40								198,7	9,0	4,54	gK								8,59	0,83	9,70	pr					20,78	1,67	8,05

12.2.2 M2Q mSF oWB (Serie WB)

Tabelle 12.3: Ergebnisse der statischen Versuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q mSF oWB (Serie WB)

Druckfestigkeiten											Zugfestigkeiten											Biegezugfestigkeiten							
PK	d	f _{c1}	f _{c2}	f _{c3}	f _{c4}	f _{c5}	f _{c6}	f _{cm}	s _x	v _x	PK	d	f _{ct1}	f _{ct2}	f _{ct3}	f _{ct4}	f _{ct5}	f _{ct6}	f _{ctm}	s _x	v _x	PK	d	f _{ct,fl1}	f _{ct,fl2}	f _{ct,fl3}	f _{ctm,fl}	s _x	v _x
-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
cyl100	164	214,7	206,2	193,6				204,9	10,6	5,18	kK	164	11,60	11,28	12,13				11,67	0,43	3,65	pr	164	43,36	42,23	36,13	40,57	3,89	9,59
pr40	164	255,7	244,9	251,1	245,2	254,6	250,1	250,3	4,5	1,81																			
pr40	268	249,2	238,8	239,4	237,4	237,6	242,1	240,7	4,5	1,86	gK	268	8,67	8,80	5,98				7,82	1,59	20,03	pr	268	37,27	41,12	42,60	40,33	2,75	6,82
cyl100	149	191,4	212,0					201,7	14,6	7,22	kK	149	12,60	11,17					11,89	1,01	8,51	pr	149	39,26	42,36	38,43	40,02	2,07	5,18
cyl150	149	190,3	201,6					195,9	8,0	4,08																			
pr40	149	260,6	253,4	248,6	253,4	247,3	251,8	252,5	4,7	1,86																			
Mittelwerte der Druckfestigkeiten											Mittelwerte der Zugfestigkeiten											Mittelwerte der Biegezugfestigkeiten							
cyl100								203,6	10,6	5,20																			
cyl150								195,9	8,0	4,08	kK								11,76	0,60	5,11								
pr40								247,8	6,8	2,73	gK								7,82	1,59	20,33	pr					40,31	2,61	6,47

12.2.3 M2Q mSF mWB (Serie HV)

Tabelle 12.4: Ergebnisse der statischen Versuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q mSF mWB (Serie HV)

Druckfestigkeiten											Zugfestigkeiten										Biegezugfestigkeiten								
PK	d	f _{c1}	f _{c2}	f _{c3}	f _{c4}	f _{c5}	f _{c6}	f _{cm}	S _x	v _x	PK	d	f _{ct1}	f _{ct2}	f _{ct3}	f _{ct4}	f _{ct5}	f _{ct6}	f _{ctm}	S _x	v _x	PK	d	f _{ct,fl1}	f _{ct,fl2}	f _{ct,fl3}	f _{ctm,fl}	S _x	v _x
-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
cyl100	36	200,4	204,2	213,2				205,9	6,6	3,20	kK	36	12,61	10,71	12,97				12,10	1,21	10,03	pr	36	37,17	30,41	37,45	35,01	3,99	11,39
pr40	36	255,9	255,9	251,4	251,6	258,9	259,5	255,5	3,5	1,36	gK	36	9,07	7,17	7,14				7,79	1,11	14,21								
cyl100	63	198,9	203,7	203,2				201,9	2,6	1,28	kK	63	10,36	13,28	13,41				12,35	1,72	13,97	pr	63	41,80	43,50	40,79	42,03	1,37	3,26
pr40	63	243,8	258,8	247,0	256,8	252,4	255,9	252,4	5,9	2,34	gK	63	8,38	8,24	9,72	8,63	9,91	10,39	9,21	0,91	9,87								
cyl100	50	195,9	211,0	198,6				201,8	8,0	3,98	kK	50	15,21	14,11	11,20				13,50	2,07	15,34	pr	50	41,04	41,68	41,28	41,34	0,32	0,78
pr40	50	248,1	242,6	249,4	257,7	258,3	258,4	252,4	6,6	2,63																			
cyl100	63	197,9	210,1	199,6				202,6	6,6	3,27	kK	63	11,39	13,37	13,15				12,64	1,09	8,60	pr	63	39,01	40,78	41,38	40,39	1,23	3,06
pr40	63	248,7	242,6	237,6	238,1	253,3	260,7	246,8	9,1	3,70	gK	63	11,11	8,97	11,32	10,86	10,68		10,59	0,94	8,86								
cyl100	79	197,6	196,7	192,8				195,7	2,6	1,31	kK	79	13,72	14,78	11,19				13,23	1,85	13,95	pr	79	36,76	36,07	33,82	35,55	1,54	4,33
pr40	79	238,6	239,1	254,1	246,0	244,1	241,6	243,9	5,7	2,35																			
cyl100	84	195,8	190,0	187,3				191,0	4,3	2,27	kK	84	14,76	14,22	15,66				14,88	0,72	4,86	pr	84	36,34	37,99	42,14	38,82	2,99	7,70
pr40	84	242,9	256,1	231,6	304,1	240,3	253,4	254,7	25,8	10,12																			
cyl100	80	203,3	213,1	203,7				206,7	5,5	2,68	kK	80	12,41	10,48	12,91				11,93	1,28	10,75	pr	80	36,98	44,14	44,23	41,78	4,16	9,97
pr40	80	252,1	250,7	244,1	253,0	253,4	255,0	251,4	3,9	1,54																			

Anlagen

Druckfestigkeiten											Zugfestigkeiten											Biegezugfestigkeiten							
PK	d	f _{c1}	f _{c2}	f _{c3}	f _{c4}	f _{c5}	f _{c6}	f _{cm}	s _x	v _x	PK	d	f _{ct1}	f _{ct2}	f _{ct3}	f _{ct4}	f _{ct5}	f _{ct6}	f _{ctm}	s _x	v _x	PK	d	f _{ct,fl1}	f _{ct,fl2}	f _{ct,fl3}	f _{ctm,fl}	s _x	v _x
-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
cyl100	100	208,6	214,6	207,3				210,2	3,9	1,85	kK	100	13,18	13,31	13,84				13,44	0,35	2,59	pr	100	33,83	33,04	38,45	35,11	2,92	8,32
pr40	100	253,2	260,1	251,7	260,0	263,8	252,1	256,8	5,1	1,99																			
cyl100	107	205,1	202,9	205,1				204,4	1,2	0,60	kK	107	13,58	14,32	14,66				14,19	0,56	3,91	pr	107	43,90	52,05	50,53	48,82	4,33	8,87
pr40	107	252,7	249,4	255,6	257,7	253,9	249,7	253,2	3,3	1,29																			
cyl100	125	218,7	208,1	193,6				206,8	12,6	6,09	kK	126	13,39	13,98	15,03				14,14	0,83	5,87	pr	126	37,89	27,76	33,13	32,93	5,07	15,39
pr40	126	231,4	241,0	225,8	226,4	234,5	233,7	232,1	5,7	2,45																			
cyl100	64	230,7	229,8	228,4				229,6	1,2	0,52	kK	71	15,23	12,82	11,19				13,08	2,03	15,55	pr	71	40,58	40,48	41,52	40,86	0,58	1,41
pr40	71	267,6	255,7	252,7	251,8	260,1	262,1	258,3	6,1	2,36																			
cyl100	65	210,5	222,0	209,1				213,9	7,1	3,32	kK	65	11,94	11,95	14,48				12,79	1,47	11,45	pr	65	33,27	31,36	32,78	32,47	0,99	3,05
pr40	65	239,9	244,5	248,1	250,1	234,4	251,1	244,7	6,5	2,66																			
cyl100	106	221,4	220,3	218,2				220,0	1,6	0,73	kK	106	14,82	13,40	11,72				13,31	1,55	11,66	pr	106	35,35	46,17	45,01	42,18	5,94	14,09
pr40	106	255,8	253,6	268,8	257,5	259,4	260,7	259,3	5,3	2,04																			
Mittelwerte der Druckfestigkeiten											Mittelwerte der Zugfestigkeiten											Mittelwerte der Biegezugfestigkeiten							
cyl100								207,0	10,9	5,25	kK								13,20	1,43	10,80								
pr40								250,9	11,0	4,38	gK								9,40	1,39	14,80	pr					39,02	5,25	13,44

12.2.4 M3Q mSF oWB

Tabelle 12.5: Ergebnisse der statischen Versuche während der zweiten Förderperiode für die Mischung M3Q mSF oWB

Druckfestigkeiten											Zugfestigkeiten											Biegezugfestigkeiten							
PK	d	f _{c1}	f _{c2}	f _{c3}	f _{c4}	f _{c5}	f _{c6}	f _{cm}	S _x	v _x	PK	d	f _{ct1}	f _{ct2}	f _{ct3}	f _{ct4}	f _{ct5}	f _{ct6}	f _{ctm}	S _x	v _x	PK	d	f _{ct,fl1}	f _{ct,fl2}	f _{ct,fl3}	f _{ctm,fl}	S _x	v _x
-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
cyl100	28	147,1	139,5	137,1				141,2	5,2	3,67	kk	33	9,35	10,27	11,65				10,42	1,16	11,11	pr	28	46,39	42,67	41,71	43,59	2,47	5,67
pr40	28	197,4	203,7	188,6	187,8	188,8	189,9	192,7	6,4	3,33																			
cyl100	90	163,7	158,9	154,0				158,9	4,9	3,06	kk	90	9,56	11,47	12,59				11,21	1,53	13,68	pr	90	37,50	46,67	36,62	40,26	5,56	13,82
pr40	90	215,4	216,7	211,6	227,3	224,2	215,8	218,5	6,0	2,73																			
cyl100	28	143,9	151,1	157,8				150,9	7,0	4,62	kk	32	10,52	10,84	11,24				10,87	0,36	3,31	pr	28	44,54	40,67	47,16	44,12	3,26	7,40
pr40	28	186,3	181,8	187,8	194,6	208,1	200,5	193,2	9,9	5,10																			
cyl100	90	143,8	156,8	164,9				155,2	10,7	6,86	kk	32	10,76	8,32	9,80				9,63	1,23	12,76	pr	90	41,43	41,22	40,13	40,92	0,70	1,71
pr40	90	243,0	243,1	218,8	226,6	223,3	220,4	229,2	11,1	4,83																			
Mittelwerte der Druckfestigkeiten											Mittelwerte der Zugfestigkeiten											Mittelwerte der Biegezugfestigkeiten							
cyl100								151,6	9,3	6,12																			
pr40								208,4	18,1	8,70	kk								10,53	1,16	11,04	pr					42,23	3,43	8,12

12.2.5 M3Q mSF mWB (Serie MHV)

Tabelle 12.6: Ergebnisse der statischen Versuche während der zweiten Förderperiode für die Mischung M3Q mSF mWB (Serie MHV)

Druckfestigkeiten											Zugfestigkeiten											Biegezugfestigkeiten							
PK	d	f _{c1}	f _{c2}	f _{c3}	f _{c4}	f _{c5}	f _{c6}	f _{cm}	S _x	v _x	PK	d	f _{ct1}	f _{ct2}	f _{ct3}	f _{ct4}	f _{ct5}	f _{ct6}	f _{ctm}	S _x	v _x	PK	d	f _{ct,fl1}	f _{ct,fl2}	f _{ct,fl3}	f _{ctm,fl}	S _x	v _x
-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
cyl100	64	189,4	177,7	181,6				182,9	6,0	3,26	kK	69	12,87	11,96	12,82				12,55	0,52	4,11	pr	69	41,82	45,96	49,54	45,77	3,87	8,45
pr40	69	240,1	239,2	244,3	243,3	245,6	244,3	242,8	2,6	1,06	gK	69	10,05	7,81	10,13	11,28	8,22		9,50	1,45	15,24								
cyl100	84	188,6	195,7	183,9				189,4	5,9	3,14	kK	94	11,28	10,71	12,52				11,50	0,92	8,02	pr	94	51,11	42,33	44,13	45,86	4,64	10,12
pr40	94	233,5	216,4	240,9	239,4	247,3	247,1	237,4	11,5	4,85	gK	94	11,85	9,39	12,26	10,75	12,01		11,25	1,19	10,59								
cyl100	58	200,8	200,1	194,8				198,6	3,3	1,65	kK	86	11,57	9,01	11,92				10,83	1,59	14,68	pr	86	52,68	39,24	41,34	44,42	7,23	16,27
pr40	86	237,1	233,4	225,8	230,1	243,0	237,3	234,5	6,0	2,58																			
cyl100	98	191,2	199,5	187,8				192,8	6,0	3,12	kK	97	11,49	12,57	11,57				11,87	0,60	5,06	pr	97	50,25	46,20	45,64	47,36	2,52	5,32
pr40	97	240,8	242,5	238,2	237,1	232,4	251,8	240,5	6,5	2,71																			
cyl100	114	185,6	187,3	185,6				186,1	1,0	0,54	kK	114	11,43	10,90	14,79				12,37	2,11	17,07	pr	114	39,38	34,78	44,63	39,60	4,93	12,45
pr40	114	208,9	217,9	211,2	217,6	218,6	207,5	213,6	5,0	2,35																			
cyl100	107	181,9	177,5	188,4				182,6	5,5	3,00	kK	107	13,13	13,90	11,00				12,67	1,50	11,86	pr	107	40,12	41,64	45,67	42,48	2,87	6,76
pr40	107	230,0	220,4	224,8	231,9	227,4	237,6	228,7	5,9	2,60																			
cyl100	147	185,2	182,1	185,4				184,3	1,8	1,00	kK	148	11,74	11,70	9,91				11,12	1,05	9,41	pr	147	41,03	43,27	43,13	42,48	1,26	2,96
pr40	147	243,4	243,5	233,7	257,3	235,6	243,4	242,8	8,3	3,42																			

Druckfestigkeiten											Zugfestigkeiten											Biegezugfestigkeiten							
PK	d	f _{c1}	f _{c2}	f _{c3}	f _{c4}	f _{c5}	f _{c6}	f _{cm}	s _x	v _x	PK	d	f _{ct1}	f _{ct2}	f _{ct3}	f _{ct4}	f _{ct5}	f _{ct6}	f _{ctm}	s _x	v _x	PK	d	f _{ct,fl1}	f _{ct,fl2}	f _{ct,fl3}	f _{ctm,fl}	s _x	v _x
-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
cyl100	183	190,4	186,7	182,6				186,6	3,9	2,10	kK	184	12,67	12,01	11,59				12,09	0,55	4,54	pr	184	46,75	44,69	44,00	45,15	1,43	3,17
pr40	184	237,3	244,9	246,3	233,4	238,4	231,6	238,6	6,0	2,49	gK	184	11,38	9,63	7,15				9,39	2,13	22,64								
cyl100	202	166,9	167,8	164,8				166,5	1,5	0,91	kK	204	10,79	11,85	11,20				11,28	0,54	4,76	pr	205	44,22	41,63	47,48	44,44	2,93	6,60
pr40	205	222,9	217,9	222,3	219,1	231,0	219,8	222,2	4,7	2,13	gK	509	10,12	11,52	10,57				10,74	0,72	6,67								
cyl100	237	195,6	193,1	183,3				190,7	6,5	3,43	kK	233	12,33	11,96	11,28				11,86	0,53	4,47	pr	232	38,03	37,37	37,74	37,71	0,33	0,88
pr40	232	238,9	225,3	233,9	240,6	226,5	232,4	232,9	6,2	2,68	gK	233	13,54	11,35	12,64				12,51	1,10	8,80								
cyl100	324	190,6	181,8	175,4				182,6	7,6	4,17	kK	326	14,86	11,95	12,45				13,09	1,55	11,88	pr	326	40,85	40,20	41,55	40,87	0,68	1,65
pr40	326	230,6	227,2	236,1	232,6	243,8	249,8	236,7	8,6	3,62																			
cyl100	28	174,8	177,1	186,1	172,9	169,0	174,5	175,7	5,8	3,29												pr	28	51,19	56,39	56,16	54,58	2,94	5,39
pr40	28	234,3	247,6	247,3	239,8	241,9	245,5	242,7	5,1	2,11																			
cyl100	369	187,3	184,9	176,5				182,9	5,7	3,11	kK	371	13,57	11,15	11,54				12,09	1,30	10,74	pr	368	46,56	48,09	52,85	49,17	3,28	6,68
pr40	368	233,3	230,2	231,3	233,2	229,4	226,8	230,7	2,5	1,06	gK	371	13,17	10,73	8,40				10,77	2,38	22,14								
cyl100	28	188,0	191,5	191,2				190,2	1,9	1,02	kK	33	9,47	8,56	9,93				9,32	0,70	7,46	pr	28	33,33	33,08	26,04	30,82	4,14	13,44
pr40	28	229,1	238,0	243,0	236,6	243,4	244,4	239,1	5,8	2,44	gK	43	10,73	11,75	12,63				11,70	0,95	8,13								
cyl100	90	182,6	176,8	172,6				177,3	5,0	2,82	kK	90	9,69	11,31	10,71				10,57	0,82	7,77	pr	90	36,95	40,18	48,24	41,79	5,82	13,92
pr40	90	215,1	216,3	209,9	213,1	217,9	201,9	212,4	5,8	2,75	gK	90	9,20	6,48	10,25				8,64	1,94	22,49								

Anlagen

Druckfestigkeiten											Zugfestigkeiten										Biegezugfestigkeiten								
PK	d	f _{c1}	f _{c2}	f _{c3}	f _{c4}	f _{c5}	f _{c6}	f _{cm}	s _x	v _x	PK	d	f _{ct1}	f _{ct2}	f _{ct3}	f _{ct4}	f _{ct5}	f _{ct6}	f _{ctm}	s _x	v _x	PK	d	f _{ct,fl1}	f _{ct,fl2}	f _{ct,fl3}	f _{ctm,fl}	s _x	v _x
-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
cyl100	28	183,3	185,7	178,0				182,3	3,9	2,16	kK	32	11,92	9,87	10,59				10,80	1,04	9,61	pr	28	47,41	44,61	41,80	44,61	2,80	6,29
pr40	28	247,5	245,0	231,3	241,9	237,6	238,8	240,4	5,8	2,41	gK	32	8,25	9,19	8,80				8,75	0,47	5,42								
cyl100	90	160,0	173,4	158,6				164,0	8,1	4,97												pr	90	55,11	62,40	34,59	50,70	14,42	28,45
pr40	90	206,0	232,1	237,7	248,3	220,8	225,1	228,3	14,6	6,39																			
Mittelwerte der Druckfestigkeiten											Mittelwerte der Zugfestigkeiten										Mittelwerte der Biegezugfestigkeiten								
cyl100								182,9	9,6	5,24	kK								11,60	1,33	11,48								
pr40								233,2	11,4	4,89	gK								10,36	1,78	17,18	pr					43,99	6,66	15,15

12.2.6 B5Q mSF oWB

Tabelle 12.7: Ergebnisse der statischen Versuche während der zweiten Förderperiode für die Mischung B5Q mSF oWB

Druckfestigkeiten											Zugfestigkeiten											Biegezugfestigkeiten								
PK	d	f _{c1}	f _{c2}	f _{c3}	f _{c4}	f _{c5}	f _{c6}	f _{cm}	S _x	v _x	PK	d	f _{ct1}	f _{ct2}	f _{ct3}	f _{ct4}	f _{ct5}	f _{ct6}	f _{ctm}	S _x	v _x	PK	d	f _{ct,fl1}	f _{ct,fl2}	f _{ct,fl3}	f _{ctm,fl}	S _x	v _x	
-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]													
cyl100	28	175,4	168,2	178,7				174,1	5,4	3,08	kK	28	9,50	10,65	9,37				9,84	0,71	7,18	pr	28	30,23	31,66	32,45	31,45	1,12	3,57	
pr40	28	217,3	223,3	219,4	213,8	223,2	223,9	220,1	4,0	1,84																				
cyl100	90	184,0	186,3	179,9				183,4	3,2	1,77	kK	90	10,11	10,57	9,12				9,94	0,74	7,44	pr	90	32,14	32,86	31,03	32,01	0,92	2,88	
pr40	90	227,4	217,6	220,9	232,3	214,1	218,6	221,8	6,8	3,05																				
cyl100	28	166,5	165,6	165,5				165,9	0,6	0,35	kK	28	8,62	8,07	8,23				8,31	0,28	3,43	pr	28	36,38	35,98	37,00	36,45	0,52	1,42	
pr40	28	221,8	216,9	223,6	218,8	218,8	219,5	219,9	2,4	1,10																				
cyl100	91	186,9	189,4	188,3				188,2	1,3	0,68												pr	91	34,35	32,68	37,66	34,90	2,53	7,26	
pr40	91	244,7	245,4	249,8	253,7	257,9	258,1	251,6	5,9	2,35																				
Mittelwerte der Druckfestigkeiten											Mittelwerte der Zugfestigkeiten											Mittelwerte der Biegezugfestigkeiten								
cyl100								177,9	9,4	5,28																				
pr40								228,4	14,5	6,36	kK								9,36	0,95	10,17	pr						33,70	2,49	7,40

12.2.7 B5Q mSF mWB (Serie BHV)

Tabelle 12.8: Ergebnisse der statischen Versuche während der zweiten Förderperiode für die Mischung B5Q mSF mWB (Serie BHV)

Druckfestigkeiten											Zugfestigkeiten										Biegezugfestigkeiten									
PK	d	f _{c1}	f _{c2}	f _{c3}	f _{c4}	f _{c5}	f _{c6}	f _{cm}	S _x	v _x	PK	d	f _{ct1}	f _{ct2}	f _{ct3}	f _{ct4}	f _{ct5}	f _{ct6}	f _{ctm}	S _x	v _x	PK	d	f _{ct,fl1}	f _{ct,fl2}	f _{ct,fl3}	f _{ctm,fl}	S _x	v _x	
-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]												
cyl100	28	191,9	193,4	200,9	192,3	197,9	191,6	194,6	3,8	1,97	kK	28	7,59	7,33	8,53				7,82	0,63	8,11	pr	28	35,82	36,74	37,02	36,52	0,62	1,71	
pr40	28	263,8	260,1	263,1	265,9	260,1	254,9	261,3	3,9	1,48	gK	28	8,28	8,86	9,33				8,82	0,53	5,96									
cyl100	57	198,8	189,6	197,3				195,2	4,9	2,53	kK	61	9,65	8,03	7,78				8,49	1,01	11,93	pr	57	34,45	36,44	36,20	35,69	1,08	3,04	
pr40	57	254,8	256,5	266,9	264,0	257,9	259,5	259,9	4,6	1,79																				
cyl100	87	180,2	180,5	173,6				178,1	3,9	2,20	kK	87	9,21	8,82	9,66				9,23	0,42	4,56	pr	87	35,37	37,69	57,22	43,43	12,00	27,63	
pr40	87	240,3	236,8	240,1	250,1	247,2	245,2	243,3	5,0	2,07																				
cyl100	84	173,6	186,1	184,7				181,5	6,8	3,76	kK	84	8,55	9,35	7,31				8,40	1,03	12,20	pr	84	30,88	38,04	33,42	34,12	3,63	10,64	
pr40	84	230,6	227,6	206,7	218,4	211,8	218,7	218,9	9,1	4,14																				
cyl100	98	189,4	188,9	182,0				186,8	4,1	2,22	kK	98	8,67	8,28	7,25				8,07	0,73	9,04	pr	97	33,59	34,93	36,51	35,01	1,46	4,18	
pr40	97	208,0	206,4	206,1	207,2	211,6	213,1	208,7	2,9	1,38																				
cyl100	89	165,5	174,6	173,6				171,2	5,0	2,92	kK	91	7,98	7,83	8,23				8,01	0,20	2,53	pr	91	30,17	34,99	29,77	31,64	2,91	9,19	
pr40	91	240,2	245,8	241,9	245,8	241,7	231,1	241,1	5,4	2,24																				
cyl100	147	198,6	202,5	200,4				200,5	1,9	0,96	kK	147	8,69	7,27	8,62				8,19	0,80	9,75	pr	146	44,91	43,07	39,27	42,42	2,87	6,78	
pr40	146	267,4	277,4	273,4	272,1	269,0	271,9	271,9	3,5	1,29																				

Druckfestigkeiten											Zugfestigkeiten										Biegezugfestigkeiten								
PK	d	f _{c1}	f _{c2}	f _{c3}	f _{c4}	f _{c5}	f _{c6}	f _{cm}	s _x	v _x	PK	d	f _{ct1}	f _{ct2}	f _{ct3}	f _{ct4}	f _{ct5}	f _{ct6}	f _{ctm}	s _x	v _x	PK	d	f _{ct,fl1}	f _{ct,fl2}	f _{ct,fl3}	f _{ctm,fl}	s _x	v _x
-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[%]	-	-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
cy100	134	188,6	179,7	192,3				186,9	6,5	3,47	kK	134	7,83	7,11	6,35				7,10	0,74	10,45	pr	133	29,90	23,41	27,70	27,00	3,30	12,22
pr40	133	223,6	230,8	222,0	227,3	220,8	228,8	225,5	4,0	1,77	gK	134	5,40	7,95	7,81				7,05	1,43	20,32								
cy100	144	187,2	191,4	189,4				189,3	2,1	1,13	kK	144	10,02	8,76	8,27				9,02	0,90	10,01	pr	145	27,61	25,75	26,41	26,59	0,94	3,55
pr40	145	240,9	251,8	251,1	242,6	244,3	245,6	246,0	4,5	1,81	gK	145	8,40	8,77	9,31				8,83	0,46	5,16								
cy100	28	199,6	198,9	193,7				197,4	3,2	1,62	kK	28	9,21	6,82	8,58				8,20	1,23	15,05	pr	28	36,42	39,31	43,69	39,80	3,66	9,20
pr40	28	243,5	241,0	244,8	245,5	249,3	244,0	244,7	2,7	1,11	gK	28	9,41	9,17	9,55				9,38	0,19	2,05								
cy100	90	197,2	199,0	203,7				200,0	3,4	1,68	kK	90	9,79	8,09	9,87				9,25	1,01	10,90	pr	90	33,04	38,93	36,65	36,21	2,97	8,21
pr40	90	247,3	245,1	243,2	242,6	240,5	246,0	244,1	2,5	1,01	gK	90	9,69	9,27	8,76				9,24	0,47	5,07								
cy100	28	205,9	200,8	191,7				199,5	7,2	3,60	kK	28	9,34	9,05	11,05				9,81	1,08	11,03	pr	28	42,91	47,89	42,62	44,47	2,96	6,66
pr40	28	260,3	265,6	271,2	276,0	266,3	261,3	266,8	6,0	2,24	gK	28	9,53	8,04	10,15				9,24	1,08	11,73								
cy100	91	205,2	212,6	212,0				209,9	4,1	1,97												pr	91	56,16	40,73	41,30	46,06	8,75	18,98
pr40	91	269,9	268,8	266,1	270,8	275,4	269,6	270,1	3,1	1,14																			
Mittelwerte der Druckfestigkeiten											Mittelwerte der Zugfestigkeiten										Mittelwerte der Biegezugfestigkeiten								
cy100								191,8	10,7	5,58	kK								8,47	1,02	12,02								
pr40								246,3	19,6	7,95	gK								8,76	1,06	12,15	pr					36,84	7,25	19,68

12.3 Last-Verformungs-Kurven einiger Zugversuche

12.3.1 Last-Verformungs-Kurven für die Serie M2Q oSF mWB (OF)

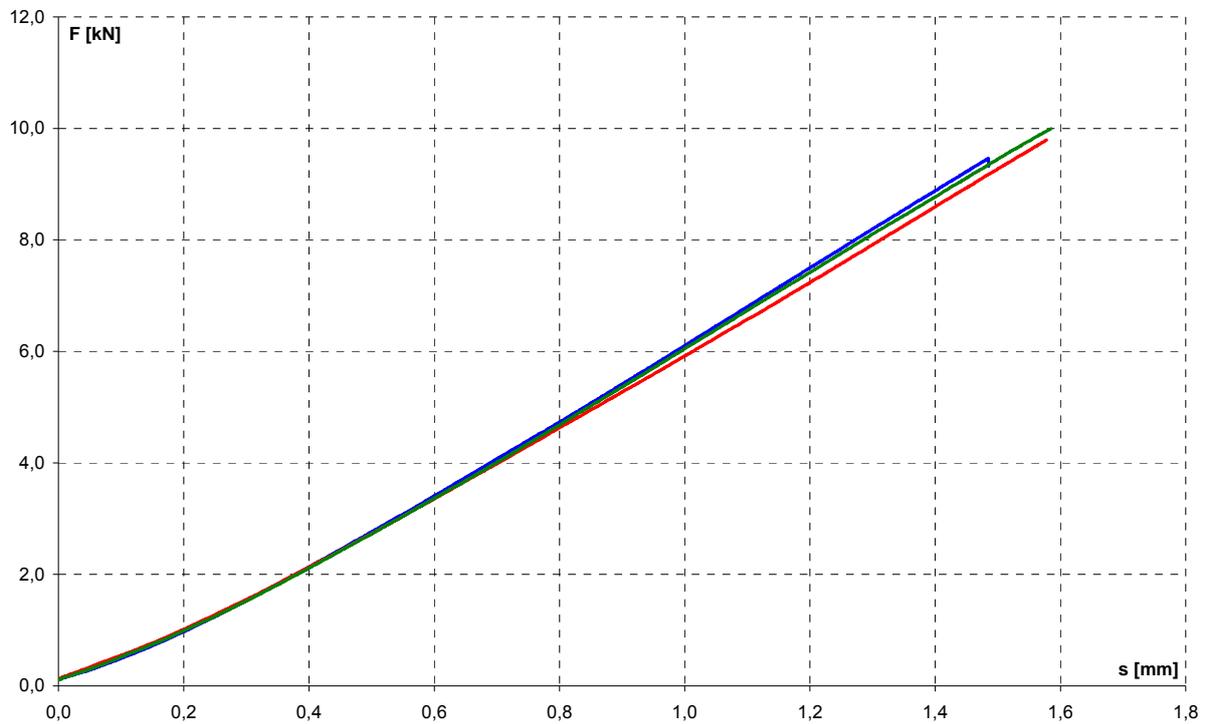


Bild 12.1: Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M2Q oSF mWB, kleine Knochen)

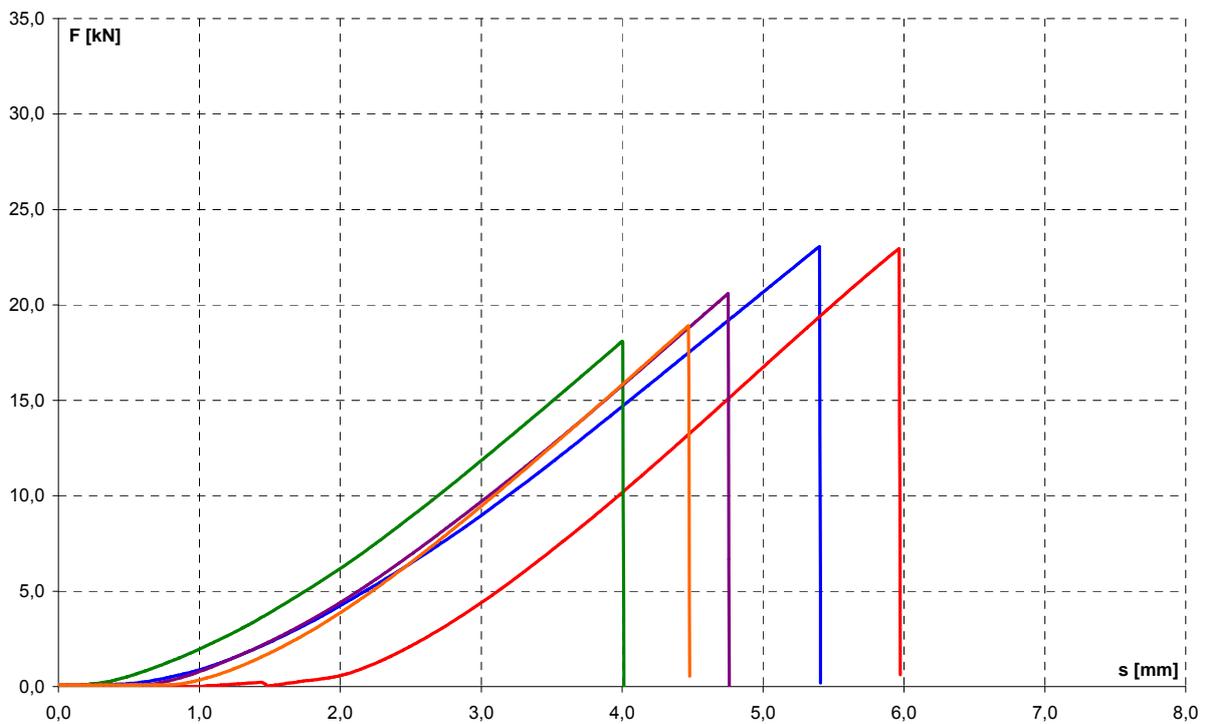


Bild 12.2: Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M2Q oSF mWB, große Knochen)

12.3.2 Last-Verformungs-Kurve für die Serie M2Q mSF oWB (WB)

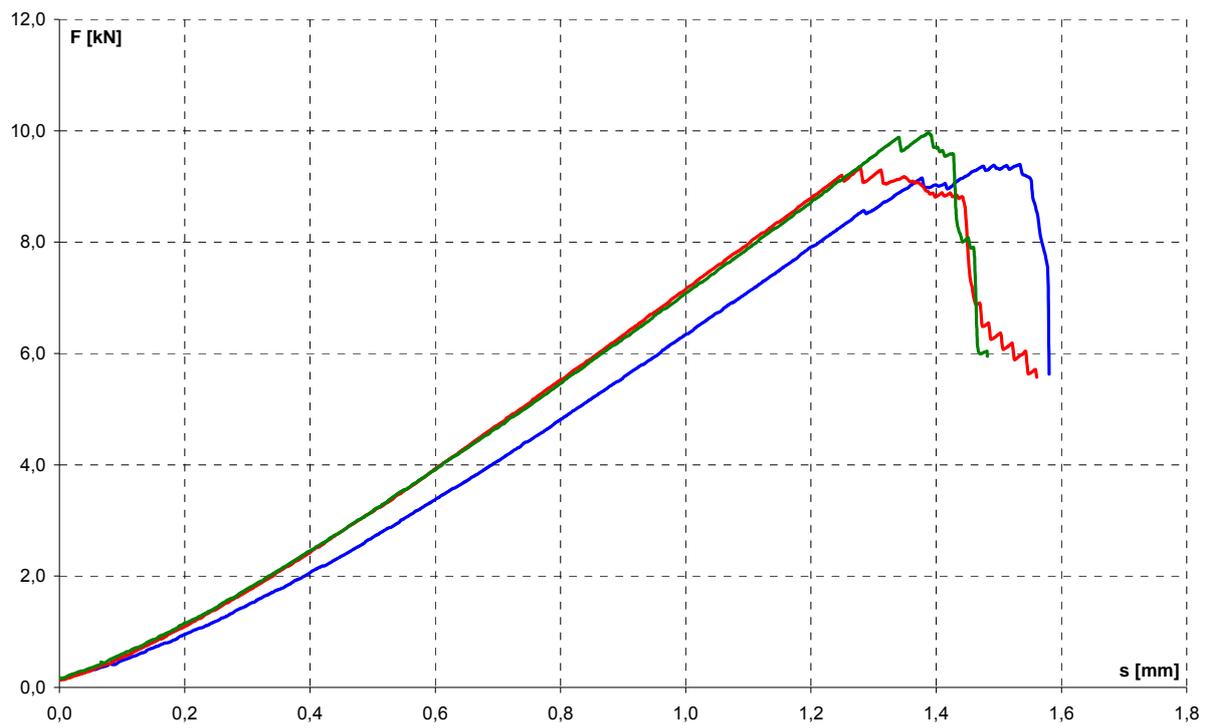


Bild 12.3: Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M2Q mSF oWB, kleine Knochen)

12.3.3 Last-Verformungs-Kurven für die Serie M2Q mSF mWB (HV)

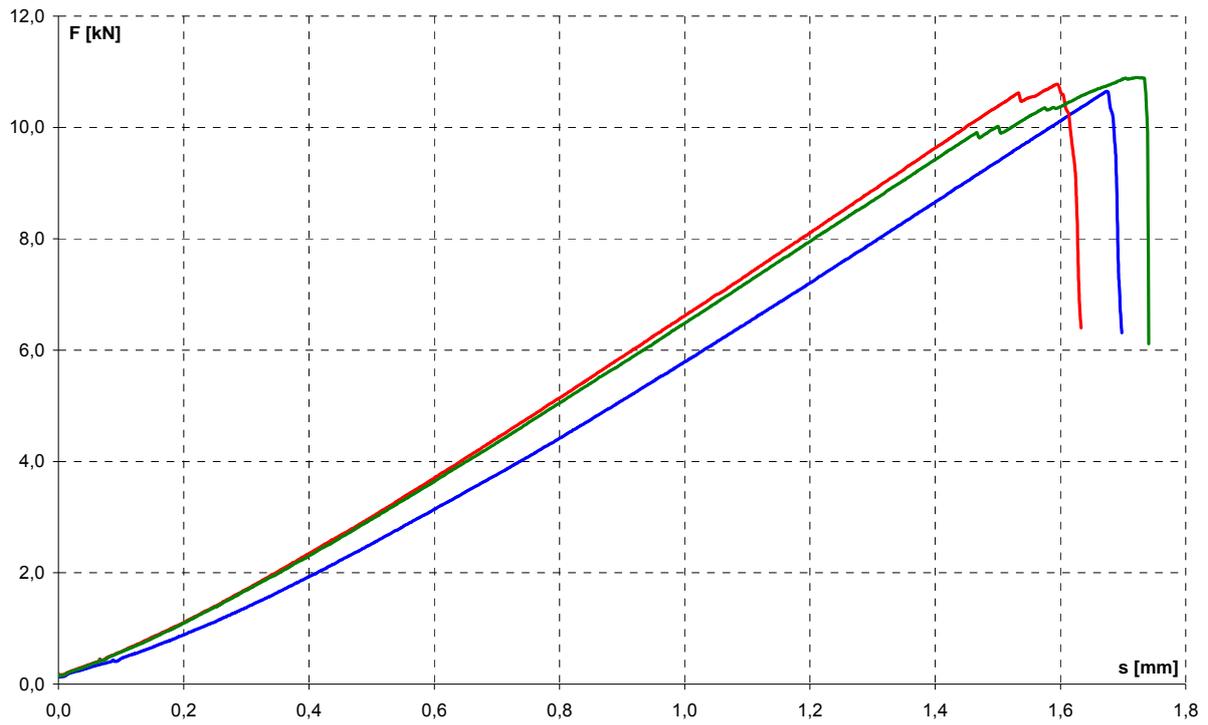


Bild 12.4: Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M2Q mSF mWB, kleine Knochen)

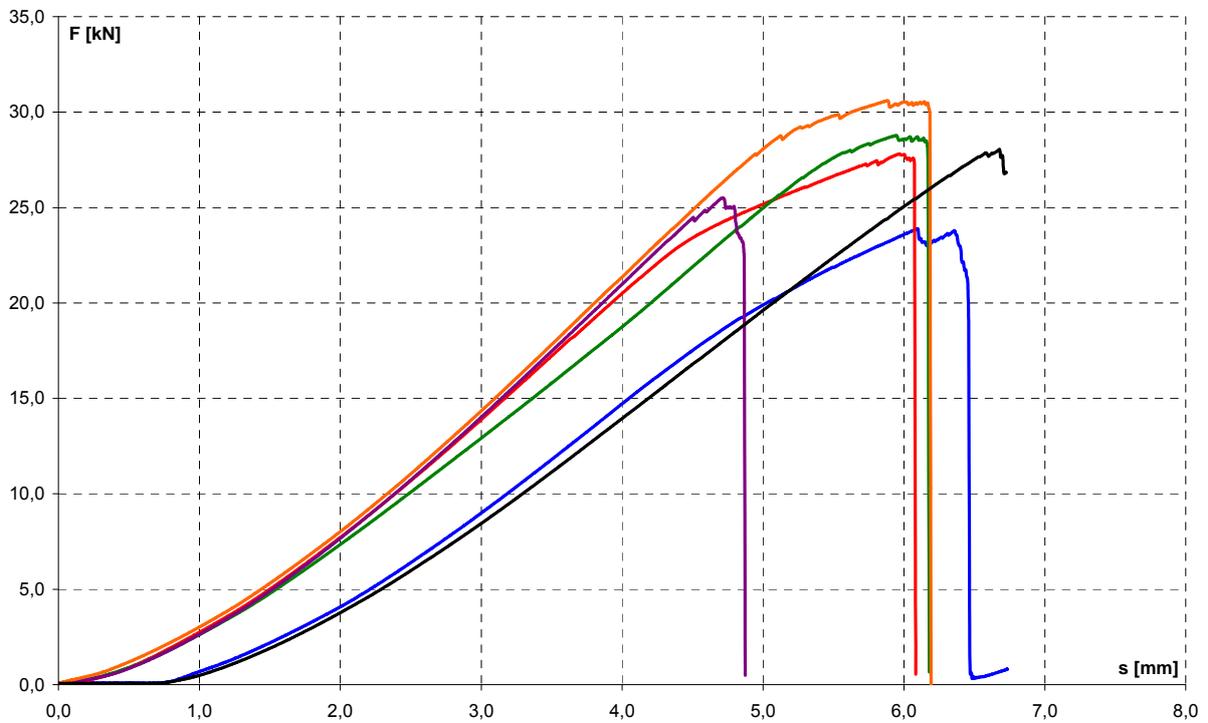


Bild 12.5: Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M2Q mSF mWB, große Knochen)

12.3.4 Last-Verformungs-Kurve für die Serie M3Q mSF oWB

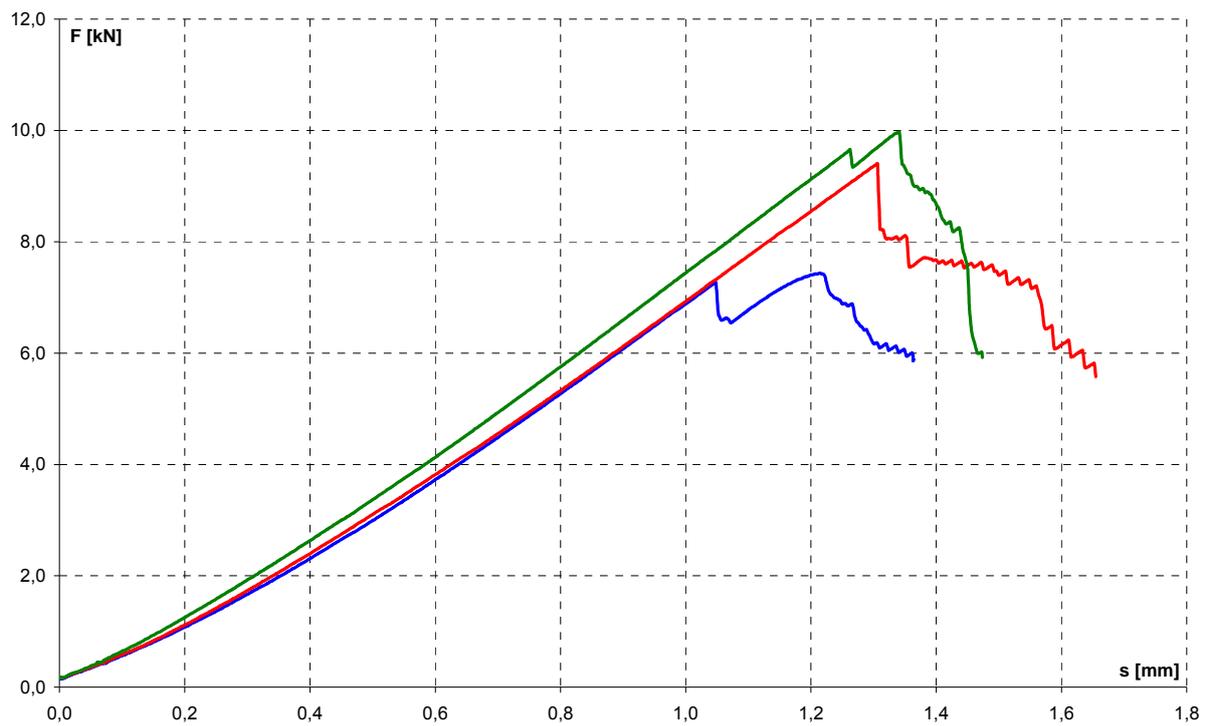


Bild 12.6: Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M3Q mSF oWB, kleine Knochen)

12.3.5 Last-Verformungs-Kurven für die Serie M3Q mSF mWB (MHV)

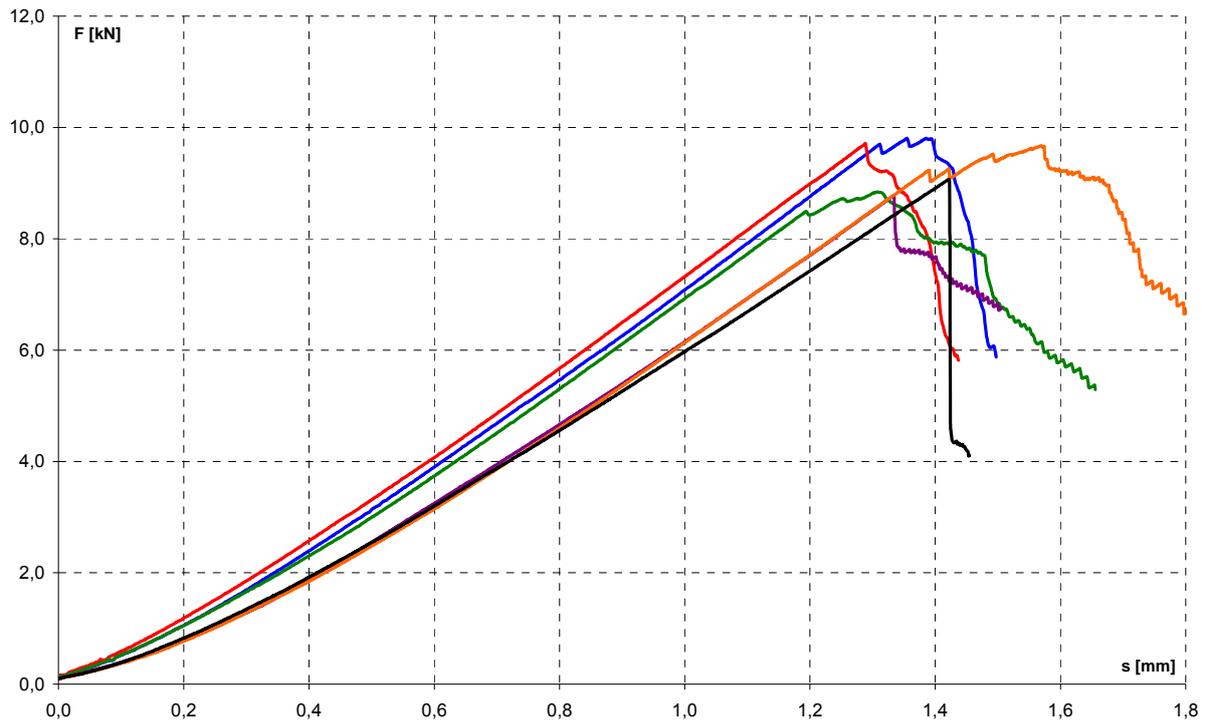


Bild 12.7: Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M3Q mSF mWB, kleine Knochen)

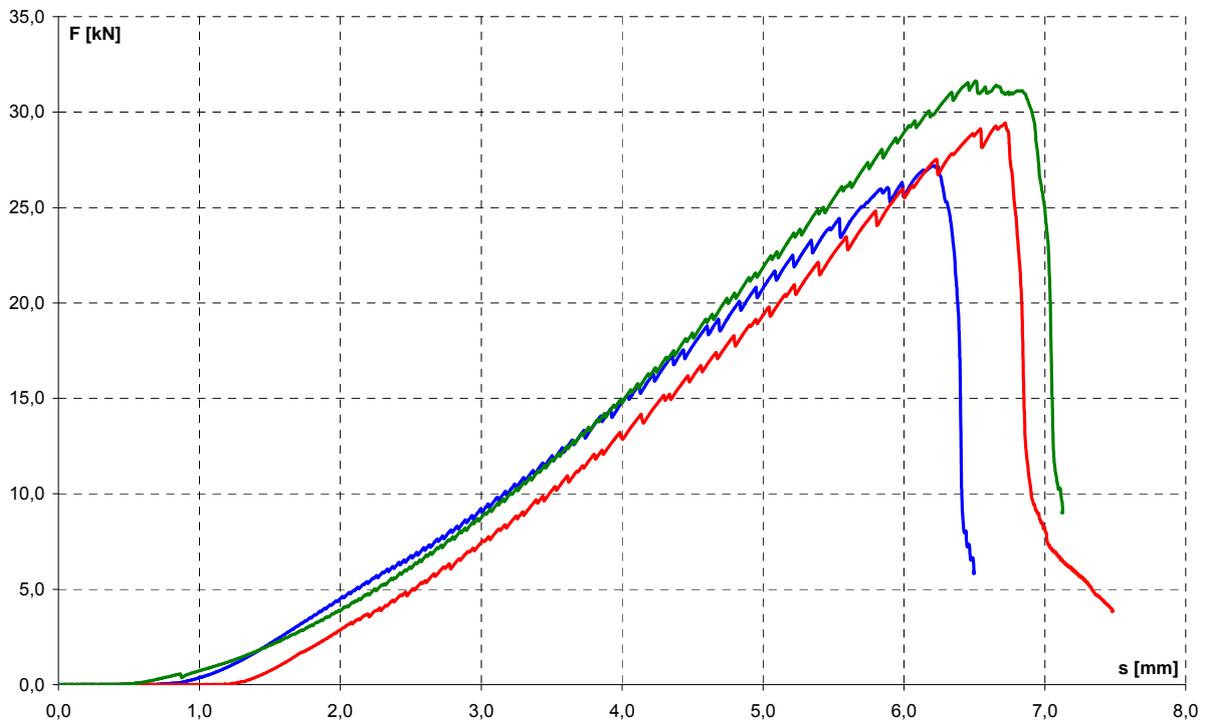


Bild 12.8: Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung M3Q mSF mWB, große Knochen)

12.3.6 Last-Verformungs-Kurve für die Serie B5Q mSF oWB

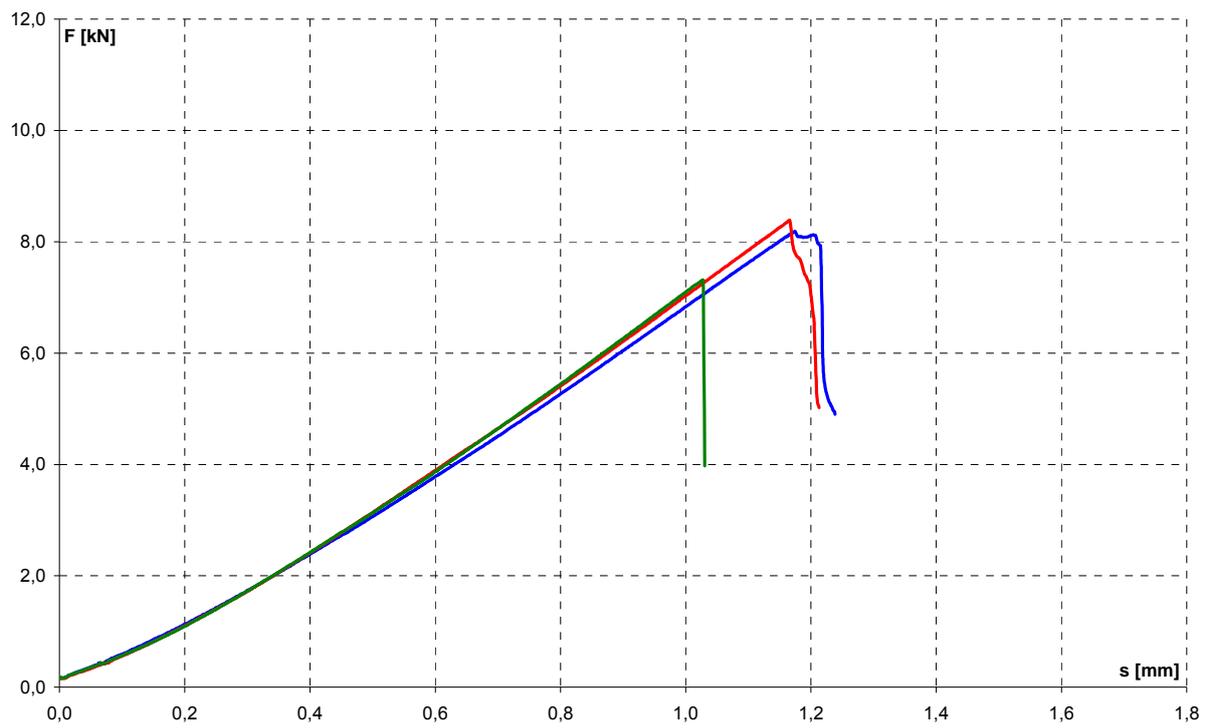


Bild 12.9: Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung B5Q mSF oWB, kleine Knochen)

12.3.7 Last-Verformungs-Kurven für die Serie B5Q mSF mWB (BHV)

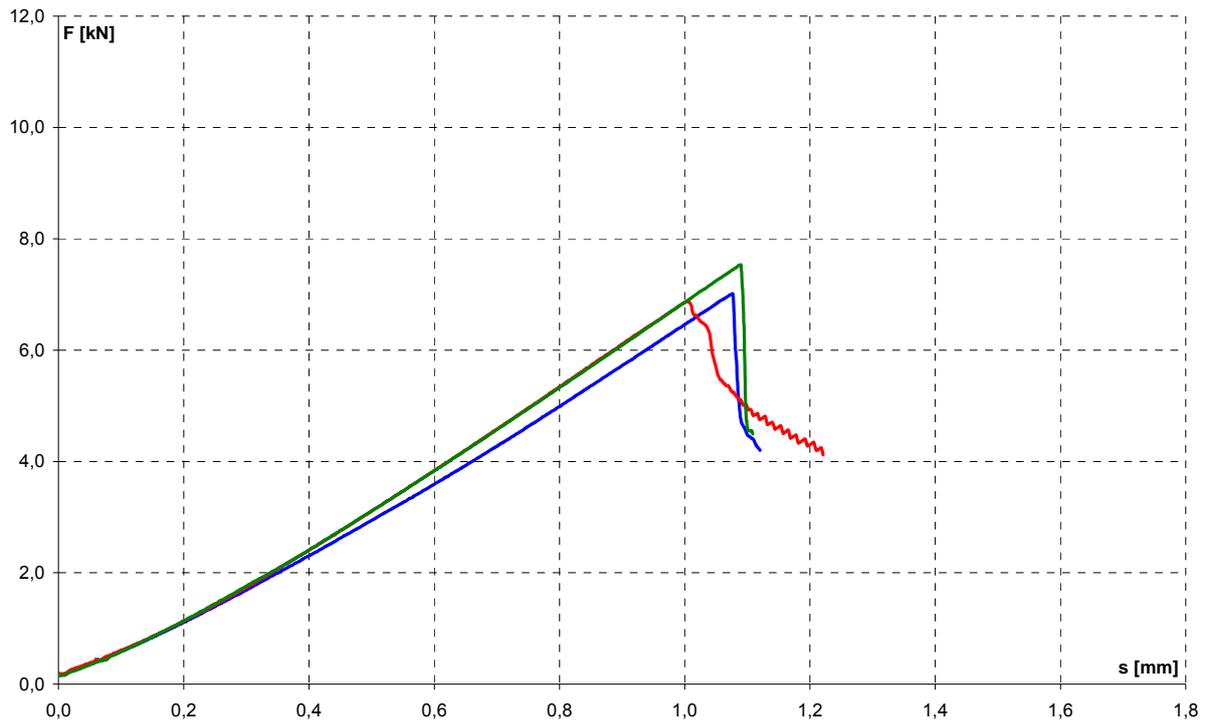


Bild 12.10: Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung B5Q mSF mWB, kleine Knochen)

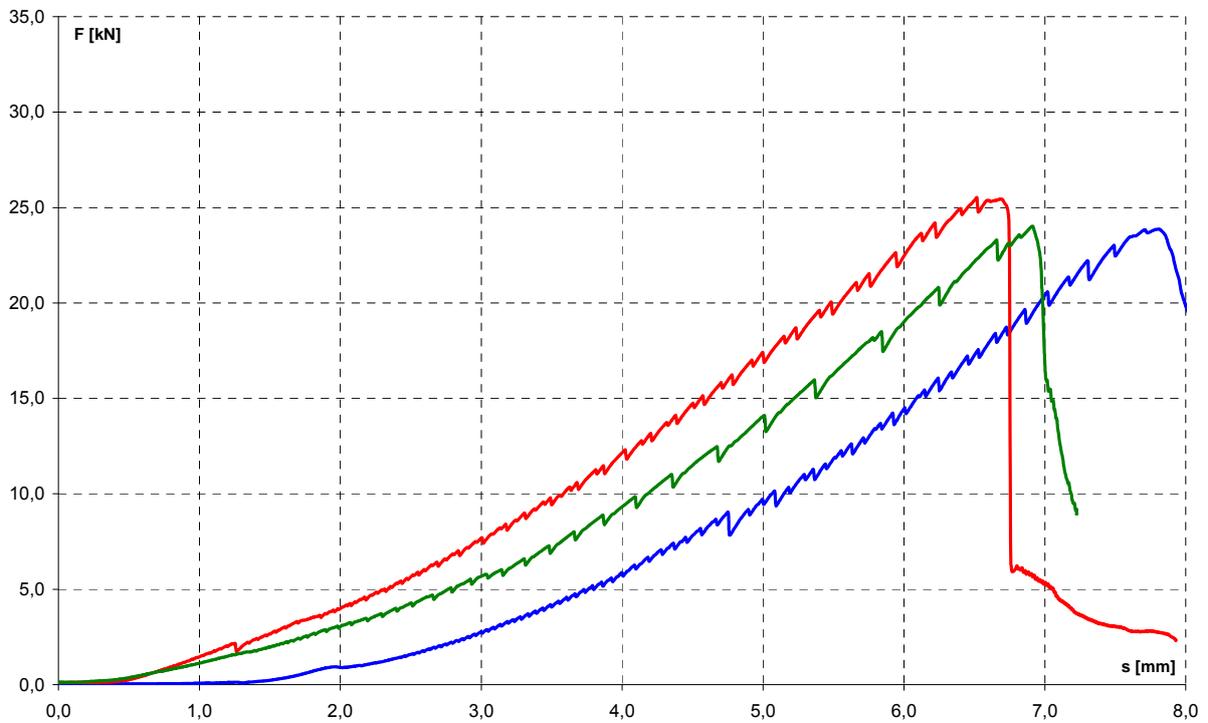


Bild 12.11: Last-Verformungs-Beziehung des UHPC (Mischung B5Q mSF mWB, große Knochen)

12.4 Übersicht der Ermüdungsversuchsergebnisse

12.4.1 M2Q oSF mWB (Serie OF)

Tabelle 12.9: Ergebnisse der Ermüdungsversuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q oSF mWB (Serie OF)

M2Q oSF mWB (OF)		f	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	LW	logN	Versagen	F_{max}
		[Hz]	[-]	[-]	[N]	[-]	[-]	[kN]
B1	01	8	0,4	-0,1	6.953.255	6,84	Durchläufer	25,8
	02	8	0,4	-0,1	3.641.031	6,56	Zug	
	03	10	0,4	-0,1	5.949.908	6,77	Zug	
	04	10	0,4	-0,1	5.080.575	6,71	Zug	
	05	10	0,4	-0,1	3.659.963	6,56	Zug	
	06	10	0,4	-0,1	6.957.927	6,84	Zug	
	07	10	0,4	-0,1	10.000.000	7,00	Durchläufer	25,1
B3	01	7	0,4	-0,3	1.842.902	6,27	Zug	
	02	7	0,4	-0,3	6.621.561	6,82	Voute	
	03	10	0,4	-0,3	1.844.578	6,27	Zug	
	04	10	0,4	-0,3	3.095.536	6,49	Zug	
	05	10	0,4	-0,3	2.021.339	6,31	Zug	
C1	01	8	0,6	-0,1	778.496	5,89	Zug	
	02	8	0,6	-0,1	4.545	3,66	Voute	
	03	8	0,6	-0,1	4.210.992	6,62	Zug	
	04	8	0,6	-0,1	1.169.301	6,07	Zug	
	05	8	0,6	-0,1	368.035	5,57	Zug	
C3	01	7	0,6	-0,3	2.859.984	6,46	Zug	
	02	7	0,6	-0,3	-	-	Zug	
	03	7	0,6	-0,3	24.891	4,40	Einspannung	
	04	7	0,6	-0,3	57.254	4,76	Zug	
	05	7	0,6	-0,3	262.624	5,42	Zug	
	06	4	0,6	-0,3	8.247	3,92	Einspannung	

12.4.2 M2Q mSF oWB (Serie WB)

Tabelle 12.10: Ergebnisse der Ermüdungsversuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q mSF oWB (Serie WB)

M2Q mSF oWB (WB)		f	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	LW	logN	Versagen	F_{max}
		[Hz]	[-]	[-]	[N]	[-]	[-]	[kN]
B1	01	8	0,4	-0,1	7.152.149	6,85	Zug	
	02	8	0,4	-0,1	6.350.655	6,80	Zug	
	03	8	0,4	-0,1	96.053	4,98	Voute	
	04	8	0,4	-0,1	9.432.130	6,97	Zug	
	05	8	0,4	-0,1	1.872.496	6,27	Voute	
B3	01	9	0,4	-0,3	4.410.272	6,64	Zug	
	02	9	0,4	-0,3	2.542.345	6,41	Zug	
	03	10	0,4	-0,3	10.000.000	7,00	Durchläufer	25,0
	04	10	0,4	-0,3	10.000.000	7,00	Durchläufer	27,4
C1	01	10	0,6	-0,1	460.872	5,66	Zug	
	02	10	0,6	-0,1	734	2,87	Einspannung	
	03	10	0,6	-0,1	521	2,72	Einspannung	
	04	3	0,6	-0,1	1.643	3,22	Einspannung	
	05	3	0,6	-0,1	294	2,47	Einspannung	
	06	8	0,6	-0,1	54.440	4,74	Einspannung	
	07	8	0,6	-0,1	1.676.906	6,22	Zug	
	08	8	0,6	-0,1	1.683.594	6,23	Zug	
	09	8	0,6	-0,1	1.175.731	6,07	Zug	
	10	8	0,6	-0,1	136.289	5,13	Zug	
C3	01	9	0,6	-0,3	191.945	5,28	Zug	
	02	9	0,6	-0,3	55.428	4,74	Zug	
	03	9	0,6	-0,3	29.113	4,46	Zug	
	04	9	0,6	-0,3	125.043	5,10	Zug	
	05	9	0,6	-0,3	140.609	5,15	Zug	

12.4.3 M2Q mSF mWB (Serie FO)

Tabelle 12.11: Ergebnisse der Ermüdungsversuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q mSF mWB (Serie FO)

M2Q mSF mWB (FO)		f	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{ctm}	LW	logN	Versagen	F_{max}
		[Hz]	[-]	[-]	[N]	[-]	[-]	[kN]
B1	01	10	0,4	-0,1	3.794.229	6,58	Voute	
	02	10	0,4	-0,1	10.000.000	7,00	Durchläufer	22,4
	03	10	0,4	-0,1	863.207	5,94	Zug	
	04	10	0,4	-0,1	10.000.000	7,00	Durchläufer	20,6
	05	10	0,4	-0,1	8.787.831	6,94	Zug	
B3	01	10	0,4	-0,3	8.639.712	6,94	Zug	
	02	10	0,4	-0,3	841.858	5,93	Zug	
	03	10	0,4	-0,3	10.000.000	7,00	Durchläufer	28,5
	04	10	0,4	-0,3	10.000.000	7,00	Durchläufer	25,4
	05	10	0,4	-0,3	10.000.000	7,00	Durchläufer	-
C1	01	10	0,6	-0,1	104.004	5,02	Zug	
	02	10	0,6	-0,1	10.000.000	7,00	Durchläufer	31,6
	03	10	0,6	-0,1	149.246	5,17	Zug	
	04	10	0,6	-0,1	1.795.915	6,25	Zug	
	05	10	0,6	-0,1	15.556	4,19	Voute	
	06	10	0,6	-0,1	1.923	3,28	Voute	
	07	10	0,6	-0,1	167.257	5,22	Zug	
C3	01	10	0,6	-0,3	1.205.861	6,08	Voute	
	02	10	0,6	-0,3	254.664	5,41	Druck/Zug	
	03	10	0,6	-0,3	465.168	5,67	Druck	
	04	10	0,6	-0,3	494.497	5,69	Zug	
	05	10	0,6	-0,3	418.056	5,62	Zug	

12.4.4 M2Q mSF mWB (Serie HV)

Tabelle 12.12: Ergebnisse der Ermüdungsversuche während der ersten Förderperiode für die Mischung M2Q mSF mWB (Serie HV)

M2Q mSF mWB (HV)		f	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{ctm}	LW	logN	Versagen	F_{max}
		[Hz]	[-]	[-]	[N]	[-]	[-]	[kN]
A3	01	10	0,2	-0,3	10.000.000	7,00	Durchläufer	
	02	10	0,2	-0,3	10.000.000	7,00	Durchläufer	
	03	10	0,2	-0,3	10.000.000	7,00	Durchläufer	25,4
A5	01	9	0,2	-0,5	10.000.000	7,00	Durchläufer	27,4
	02	9	0,2	-0,5	3.582.838	6,55	Einspannung	
	03	8	0,2	-0,5	10.000.000	7,00	Durchläufer	
	04	8	0,2	-0,5	1.329.906	6,12	Zug	
	05	8	0,4	-0,5	10.013.343	7,00	Durchläufer	
B0	01	12	0,4	0,0	10.000.000	7,00	Durchläufer	17,9
	02	16	0,4	0,0	10.000.000	7,00	Durchläufer	26,7
	03	16	0,4	0,0	13.603.700	7,13	Durchläufer	25,4
B1	01	8	0,4	-0,1	10.822.983	7,03	Durchläufer	31,7
	02	8	0,4	-0,1	10.630.354	7,03	Durchläufer	30,5
	03	8	0,4	-0,1	10.000.000	7,00	Durchläufer	25,9
B3	01	10	0,4	-0,3	10.000.000	7,00	Durchläufer	20,6
	02	10	0,4	-0,3	10.000.000	7,00	Durchläufer	25,7
	03	10	0,4	-0,3	10.000.000	7,00	Durchläufer	22,0
B5	01	5	0,4	-0,5	837.625	5,92	Zug	
	02	5	0,4	-0,5	1.390.928	6,14	Zug	
	03	5	0,4	-0,5	3.382.834	6,53	Zug	
	04	9	0,4	-0,5	11.658.612	7,07	Durchläufer	27,4
	05	9	0,4	-0,5	9.266.666	6,97	Zug	
C0	01	8	0,6	0,0	10.013.957	7,00	Durchläufer	28,0
	02	9	0,6	0,0	9.532.436	6,98	Zug	
	03	9	0,6	0,0	10.000.000	7,00	Durchläufer	26,9

M2Q mSF mWB (HV)		f	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	LW	logN	Versagen	F_{max}
		[Hz]	[-]	[-]	[N]	[-]	[-]	[kN]
C1	01	8	0,6	-0,1	279.868	5,45	Zug	
	02	8	0,6	-0,1	112.297	5,05	Zug	
	03	8	0,6	-0,1	215.677	5,33	Zug	
	04	8	0,6	-0,1	4.420.645	6,65	Zug	
	05	8	0,6	-0,1	43.643	4,64	Zug	
	06	8	0,6	-0,1	70.713	4,85	Zug	
C3	01	10	0,6	-0,3	1.576.429	6,20	Zug	
	02	10	0,6	-0,3	36.225	4,56	Zug	
	03	10	0,6	-0,3	3.351.790	6,53	Zug	
	04	10	0,6	-0,3	547.860	5,74	Druck/Zug	
	05	10	0,6	-0,3	8.253.382	6,92	Zug	
	06	5	0,6	-0,3	28.080	4,45	Zug	
C5	01	3	0,6	-0,5	5.423	3,73	Zug	
	02	3	0,6	-0,5	2.148	3,33	Druck	
	03	3	0,6	-0,5	57.060	4,76	Zug	
	04	3	0,6	-0,5	40.172	4,60	Druck/Zug	
	05	3	0,6	-0,5	16.246	4,21	Zug	
	06	3	0,6	-0,5	2.586	3,41	Einspannung	
	07	3	0,6	-0,5	3.712	3,57	Zug	
	08	3	0,6	-0,5	146.948	5,17	Zug	
	09	3	0,6	-0,5	5.977	3,78	Druck/Zug	
	10	3	0,6	-0,5	13.748	4,14	Einspannung	
D0	01	6	0,8	0,0	12.414	4,09	Zug	
	02	6	0,8	0,0	15.634	4,19	Zug	
	03	6	0,8	0,0	13.333	4,12	Zug	
	04	6	0,8	0,0	347	2,54	Einspannung	
	05	6	0,8	0,0	88.034	4,94	Zug	
	06	6	0,8	0,0	90.299	4,96	Zug	
D1	01	5	0,8	-0,1	351	2,55	Zug	
	02	5	0,8	-0,1	3.328	3,52	Zug	
	03	5	0,8	-0,1	5.073	3,71	Zug	
	04	1	0,8	-0,1	15	1,18	Einspannung	
	05	1	0,8	-0,1	29	1,46	Einspannung	
	06	1	0,8	-0,1	18	1,26	Voute	
	07	1	0,8	-0,1	5	0,70	Einspannung	
	08	1	0,8	-0,1	72	1,86	Voute	

12.4.5 M3Q mSF mWB (Serie MHV)

Tabelle 12.13: Ergebnisse der Ermüdungsversuche während der zweiten Förderperiode für die Mischung M3Q mSF mWB (Serie MHV)

M3Q mSF mWB (MHV)		f	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	LW	logN	Versagen	F_{max}
		[Hz]	[-]	[-]	[N]	[-]	[-]	[kN]
A3	01	82	0,2	-0,3	100.000.000	8,00	Durchläufer	
	02	83	0,2	-0,3	100.000.000	8,00	Durchläufer	
	03	99	0,2	-0,3	567.500	5,75	Voute	
	04	105	0,2	-0,3	200.000.000	8,30	Durchläufer	
	05	101	0,2	-0,3	5.071.454	6,71	Zug	
A4	01	10	0,2	-0,4	20.000.000	7,30	Durchläufer	28,5
	02	10	0,2	-0,4	20.000.000	7,30	Durchläufer	
	03	10	0,2	-0,4	20.000.000	7,30	Durchläufer	29,7
A7	01	6	0,2	-0,7	4.384.254	6,64	Druck	
	02	8	0,2	-0,7	10.000.000	7,00	Durchläufer	29,1
	03	8	0,2	-0,7	19.450.815	7,29	Durchläufer	27,9
	04	8	0,2	-0,7	20.109.559	7,30	Druck	
	05	8	0,2	-0,7	957.094	5,98	Druck	
B3	01	82	0,4	-0,3	5.540.753	6,74	Zug	
	02	82	0,4	-0,3	16.238.273	7,21	Zug	
	03	82	0,4	-0,3	39.143	4,59	Einspannung	
	04	82	0,4	-0,3	253.285	5,40	Druck/Zug	
	05	82	0,4	-0,3	730.769	5,86	Voute	
	06	80	0,4	-0,3	1.918.077	6,28	Zug	
	07	80	0,4	-0,3	26.185.953	7,42	Zug	
B4	01	10	0,4	-0,4	10.000.000	7,00	Durchläufer	27,5
	02	10	0,4	-0,4	10.000.000	7,00	Durchläufer	34,8
	03	10	0,4	-0,4	15.000.000	7,18	Durchläufer	32,9
	04	10	0,4	-0,4	220.842	5,34	Einspannung	
	05	10	0,4	-0,4	15.000.000	7,18	Durchläufer	28,7
B7	01	4	0,4	-0,7	1.042.047	6,02	Zug	
	02	4	0,4	-0,7	2.368.340	6,37	Zug	
	03	4	0,4	-0,7	2.337.400	6,37	Zug	
	04	4	0,4	-0,7	10.000.000	7,00	Durchläufer	30,8
	05	4	0,4	-0,7	-	-	Zug	36,0
	06	6	0,4	-0,7	3.378.065	6,53	Druck	

M3Q mSF mWB (MHV)		f	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	LW	logN	Versagen	F_{max}
		[Hz]	[-]	[-]	[N]	[-]	[-]	[kN]
C2	01	10	0,6	-0,2	-	-	Einspannung	
	02	10	0,6	-0,2	-	-	Einspannung	
	03	10	0,6	-0,2	-	-	Einspannung	
	04	10	0,6	-0,2	1.434.963	6,16	Zug	
	05	10	0,6	-0,2	10.000.000	7,00	Durchläufer	27,4
	06	10	0,6	-0,2	10.000.000	7,00	Durchläufer	28,3
	07	10	0,6	-0,2	6.475.043	6,81	Zug	
	08	10	0,6	-0,2	-	-	Einspannung	
C4	01	9	0,6	-0,4	936.363	5,97	Druck	
	02	9	0,6	-0,4	-	-	Einspannung	
	03	9	0,6	-0,4	142.193	5,15	Einspannung	
	04	9	0,6	-0,4	619.181	5,79	Einspannung	
	05	9	0,6	-0,4	358.978	5,56	Druck	
	06	9	0,6	-0,4	1.967.865	6,29	Zug	
	07	9	0,6	-0,4	295.233	5,47	Zug	
	08	9	0,6	-0,4	27.576	4,44	Zug	
C7	01	3	0,6	-0,7	23.529	4,37	Druck/Zug	
	02	3	0,6	-0,7	5.395	3,73	Einspannung	
	03	3	0,6	-0,7	35.830	4,55	Druck/Zug	
	04	3	0,6	-0,7	23.348	4,37	Einspannung	
	05	3	0,6	-0,7	45.657	4,66	Druck/Zug	
	06	3	0,6	-0,7	-	-	Einspannung	
	07	3	0,6	-0,7	52.811	4,72	Zug	
	08	3	0,6	-0,7	49.155	4,69	Zug	
	09	3	0,6	-0,7	-	-	Einspannung	
D0	01	8	0,8	0,0	9.989.112	7,00	Durchläufer	34,1
	02	8	0,8	0,0	44.886	4,65	Zug	
	03	8	0,8	0,0	14.452	4,16	Zug	
D1	01	8	0,8	-0,1	42	1,62	Zug	
	02	8	0,8	-0,1	10.000.000	7,00	Durchläufer	33,1
	03	8	0,8	-0,1	227.518	5,36	Zug	

12.4.6 B5Q mSF mWB (Serie BHV)

Tabelle 12.14: Ergebnisse der Ermüdungsversuche während der zweiten Förderperiode für die Mischung B5Q mSF mWB (Serie BHV)

B5Q mSF mWB (BHV)		f	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	LW	logN	Versagen	F_{max}
		[Hz]	[-]	[-]	[N]	[-]	[-]	[kN]
A3	01	10	0,2	-0,3	10.000.000	7,00	Durchläufer	26,4
	02	10	0,2	-0,3	13.242.546	7,12	Durchläufer	23,9
	03	10	0,2	-0,3	18.042.545	7,26	Durchläufer	25,6
A5	01	8	0,2	-0,5	20.000.000	7,30	Durchläufer	28,4
	02	8	0,2	-0,5	16.443.412	7,22	Durchläufer	18,6
	03	8	0,2	-0,5	10.000.000	7,00	Durchläufer	27,0
A7	01	6	0,2	-0,7	460.691	5,66	Zug	
	02	6	0,2	-0,7	555.498	5,74	Zug	
	03	6	0,2	-0,7	35.166	4,55	Einspannung	
	04	6	0,2	-0,7	932.062	5,97	Druck	
	05	6	0,2	-0,7	1.447.346	6,16	Druck	
	06	6	0,2	-0,7	1.267.515	6,10	Druck	
B5	01	8	0,4	-0,5	9.574.863	6,98	Zug	
	02	8	0,4	-0,5	1.038.166	6,02	Zug	
	03	8	0,4	-0,5	2.438.651	6,39	Zug	
B7	01	8	0,4	-0,7	106.308	5,03	Druck	
	02	8	0,4	-0,7	212.001	5,33	Druck	
	03	8	0,4	-0,7	132.933	5,12	Zug	
C3	01	104	0,6	-0,3	29.227	4,47	Voute	
	02	104	0,6	-0,3	100.000.000	8,00	Durchläufer	
	03	104	0,6	-0,3	100.000.000	8,00	Durchläufer	
C5	01	10	0,6	-0,5	3.021.974	6,48	Druck	
	02	10	0,6	-0,5	8.417.648	6,93	Druck	
	03	10	0,6	-0,5	16.989	4,23	Druck	
	04	10	0,6	-0,5	-	-	Einspannung	
	05	10	0,6	-0,5	936.415	5,97	Druck	
	06	10	0,6	-0,5	6.649.880	6,82	Druck	

B5Q mSF mWB (BHV)		f	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	LW	logN	Versagen	F_{max}
		[Hz]	[-]	[-]	[N]	[-]	[-]	[kN]
C7	01	6	0,6	-0,7	244.303	5,39	Druck	
	02	6	0,6	-0,7	261.997	5,42	Druck	
	03	6	0,6	-0,7	153.426	5,19	Druck	
	04	6	0,6	-0,7	341.367	5,53	Druck	
	05	6	0,6	-0,7	243.458	5,39	Zug	
D5	01	8	0,8	-0,5	394	2,60	Voute	
	02	8	0,8	-0,5	24.085	4,38	Zug	
	03	8	0,8	-0,5	15.695	4,20	Zug	
D7	01	8	0,8	-0,7	5.772	3,76	Zug	
	02	8	0,8	-0,7	7.241	3,86	Zug	
	03	8	0,8	-0,7	2.068	3,32	Zug	

12.5 Wöhlerlinien aller Versuchsserien

12.5.1 Wöhlerlinien für die Serie M2Q oSF mWB (OF)

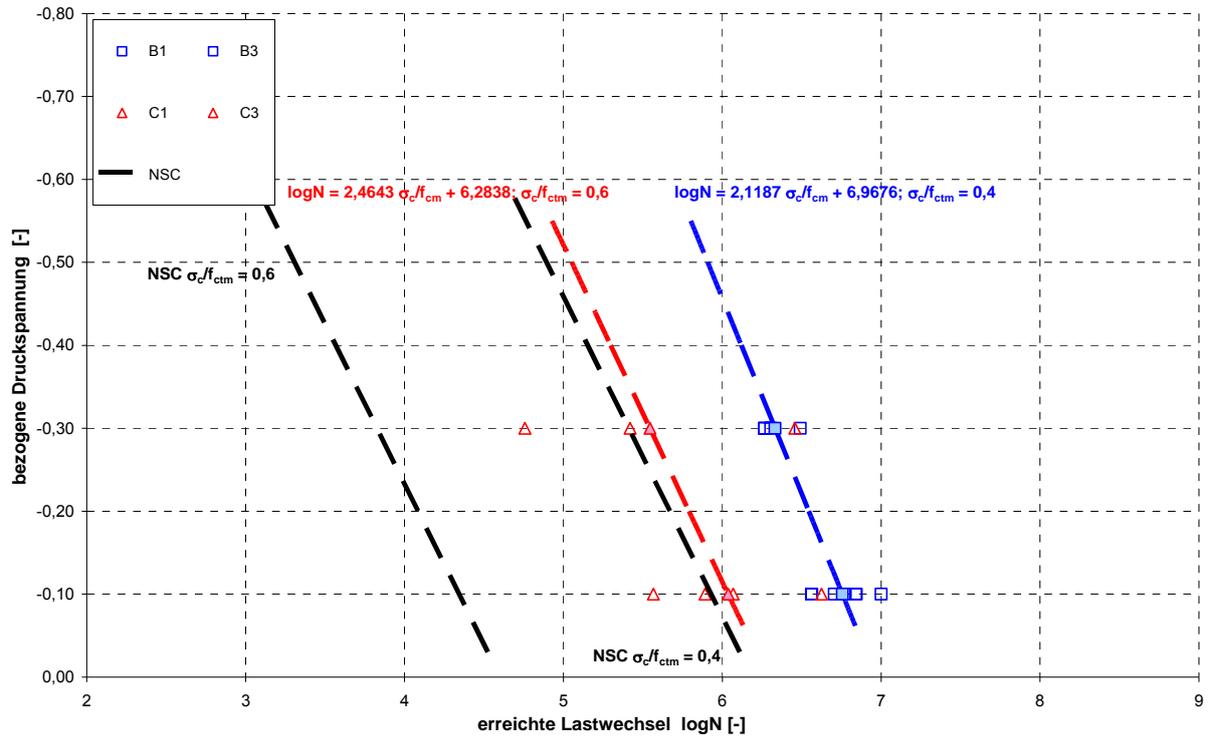


Bild 12.12: Wöhlerlinien des UHPC (M2Q oSF mWB (OF), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)

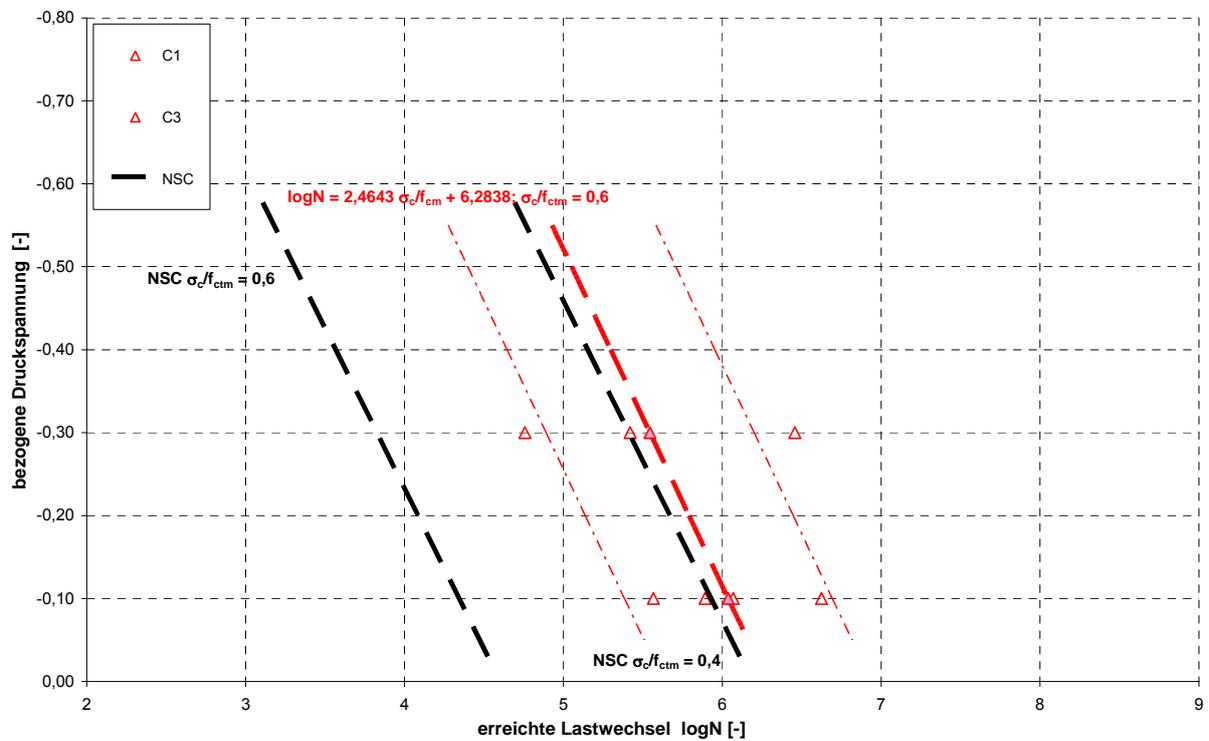


Bild 12.13: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q oSF mWB (OF), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$)

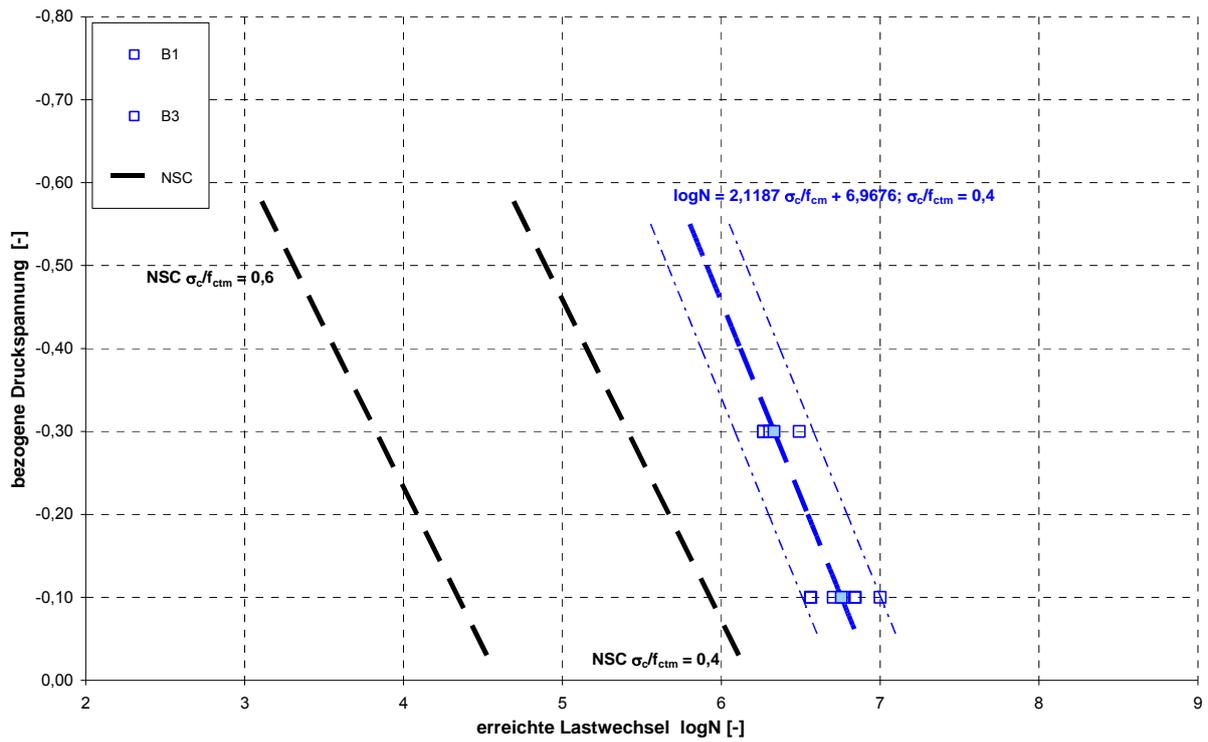


Bild 12.14: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q oSF mWB (OF), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)

12.5.2 Wöhlerlinien für die Serie M2Q mSF oWB (WB)

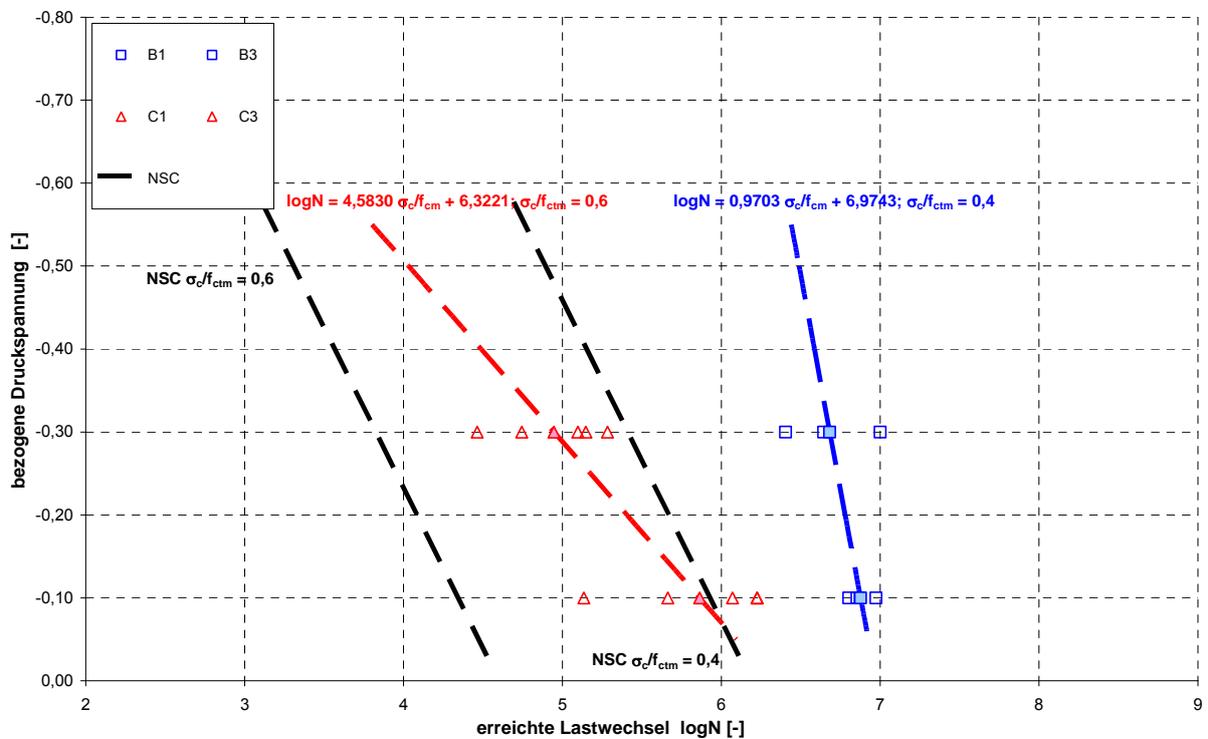


Bild 12.15: Wöhlerlinien des UHPC (M2Q mSF oWB (WB), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)

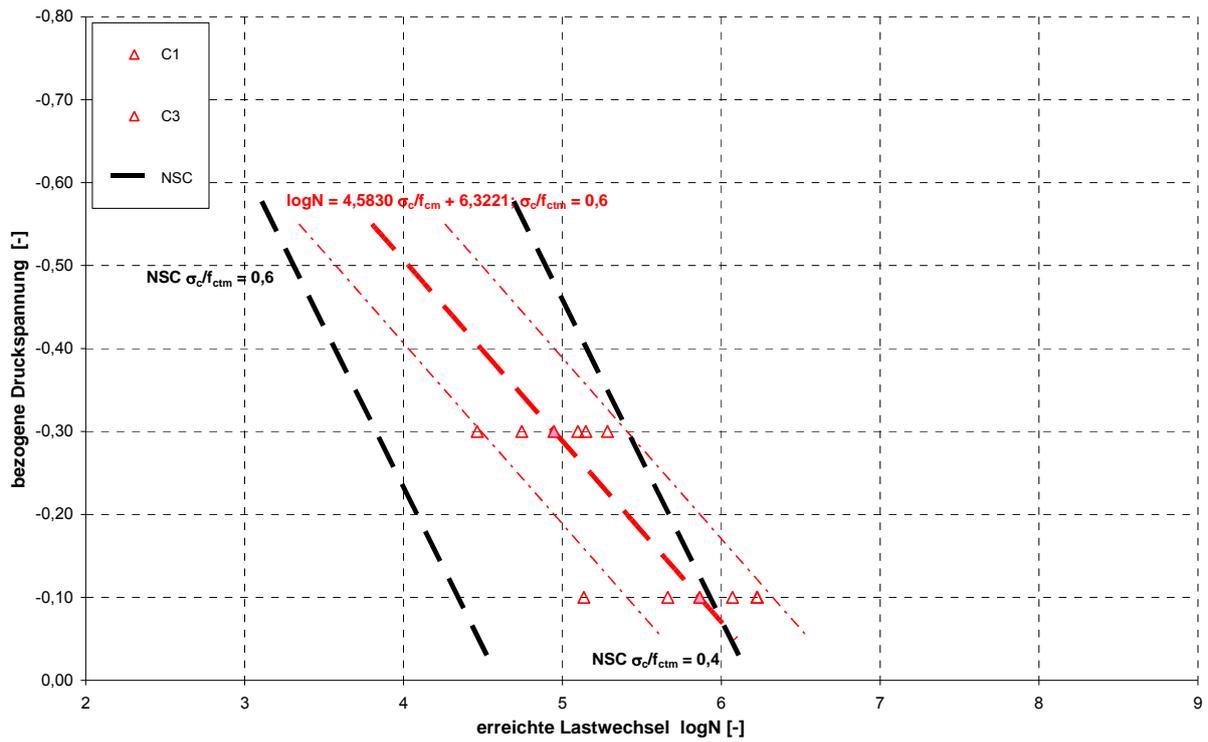


Bild 12.16: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q mSF oWB (WB), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$)

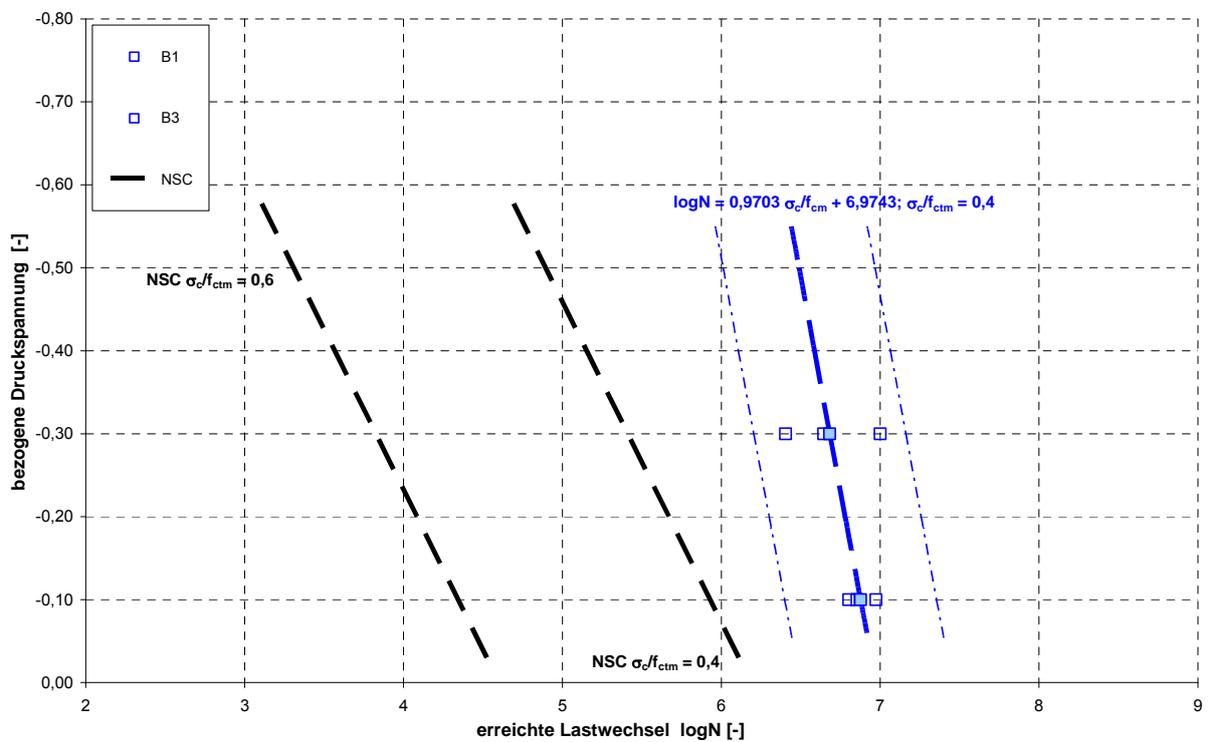


Bild 12.17: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q mSF oWB (WB), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)

12.5.3 Wöhlerlinien für die Serie M2Q mSF mWB (FO)

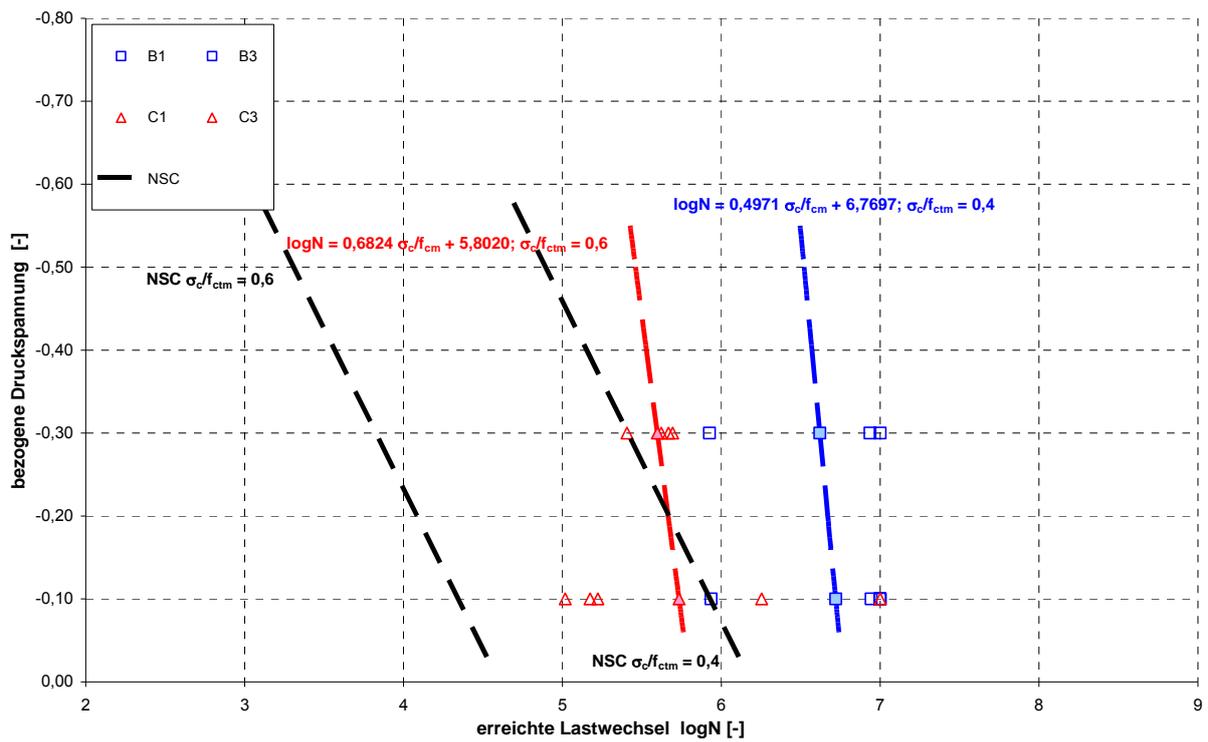


Bild 12.18: Wöhlerlinien des UHPC (M2Q mSF mWB (FO), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)

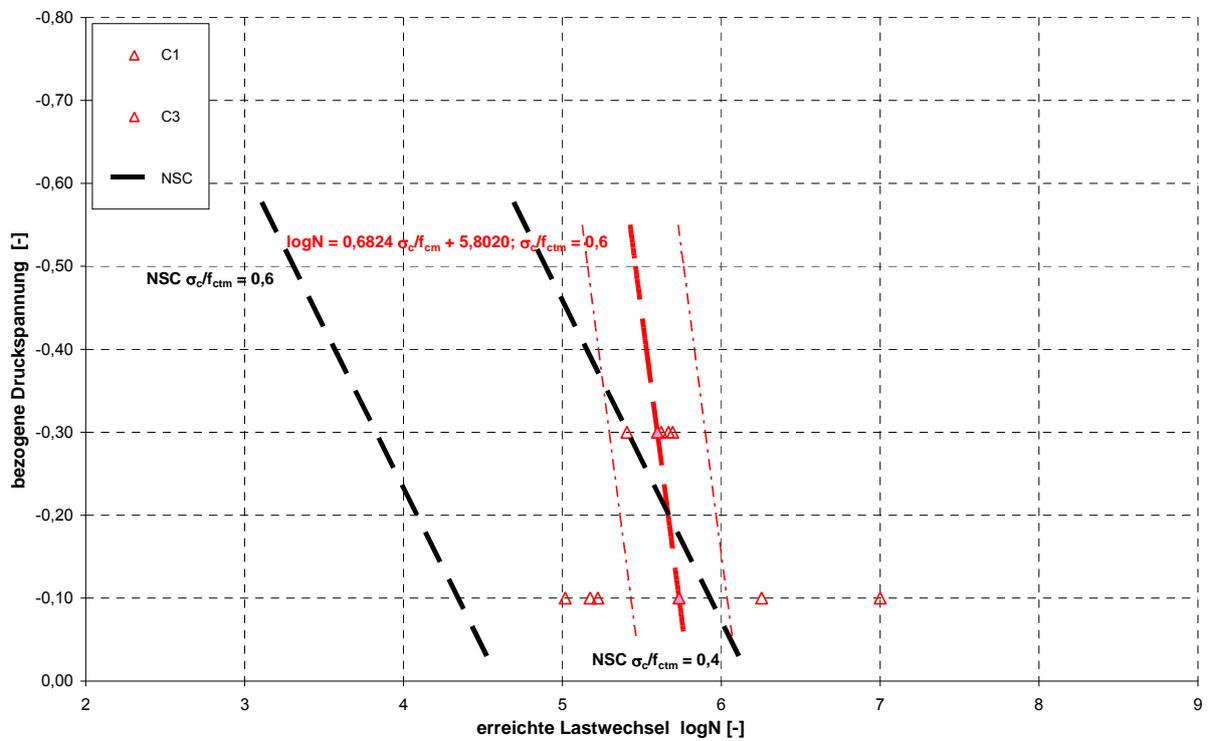


Bild 12.19: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q mSF mWB (FO), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$)

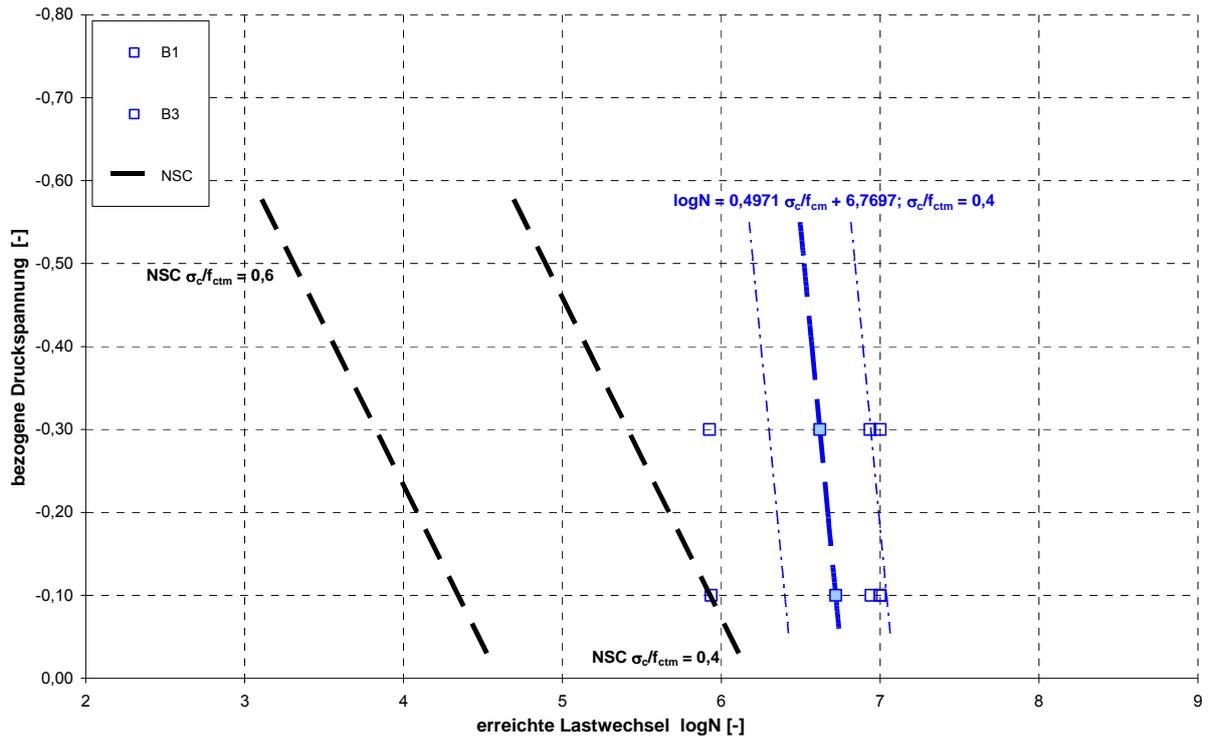


Bild 12.20: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q mSF mWB (FO), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)

12.5.4 Wöhlerlinien für die Serie M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV)

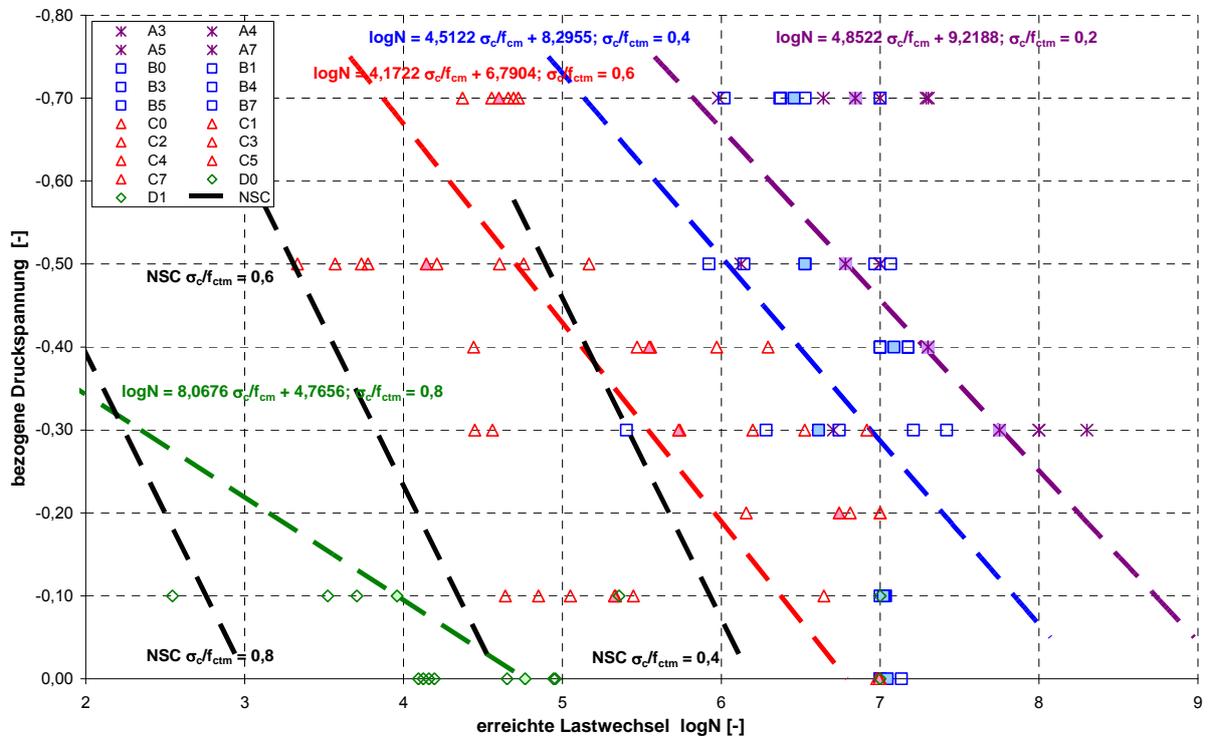


Bild 12.21: Wöhlerlinien des UHPC (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$)

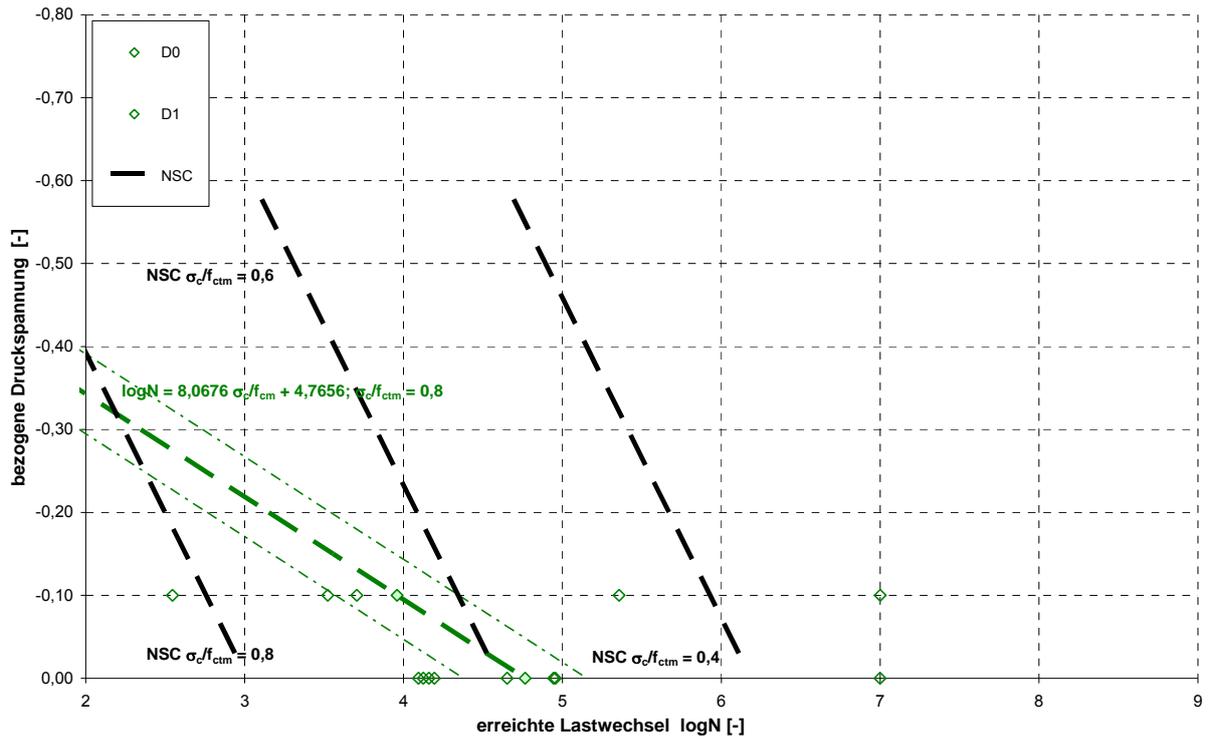


Bild 12.22: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$)

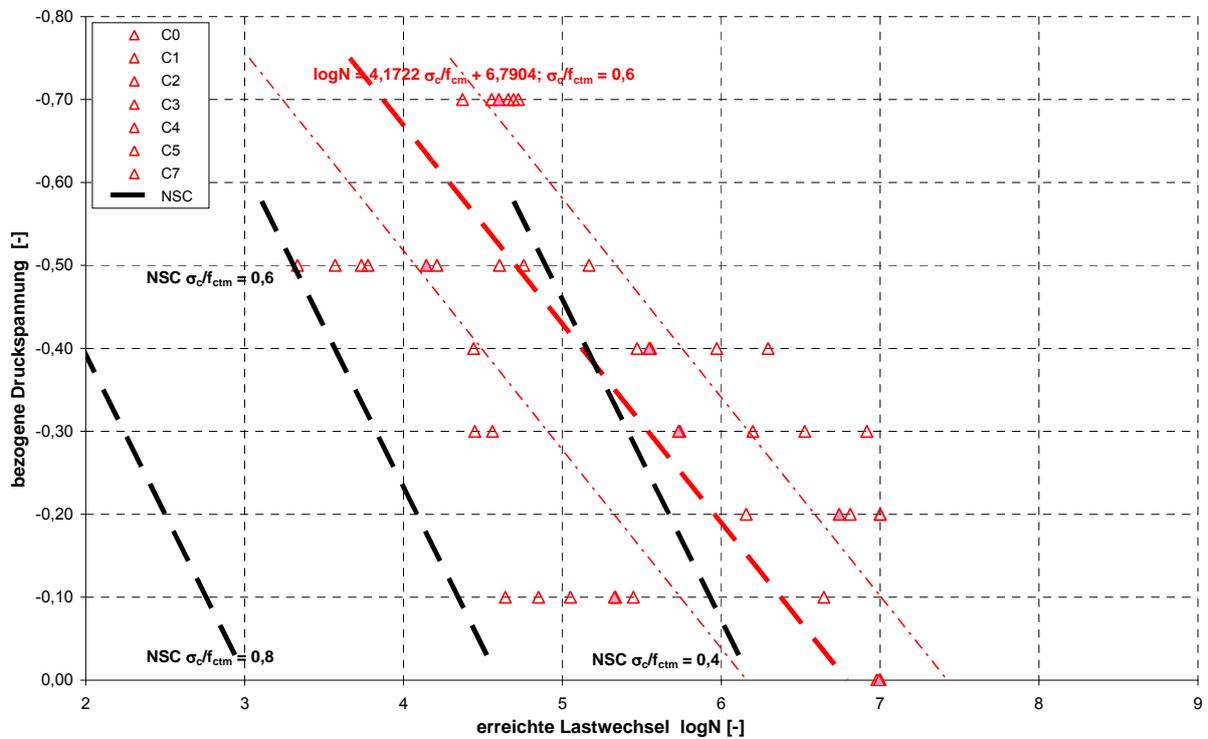


Bild 12.23: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$)

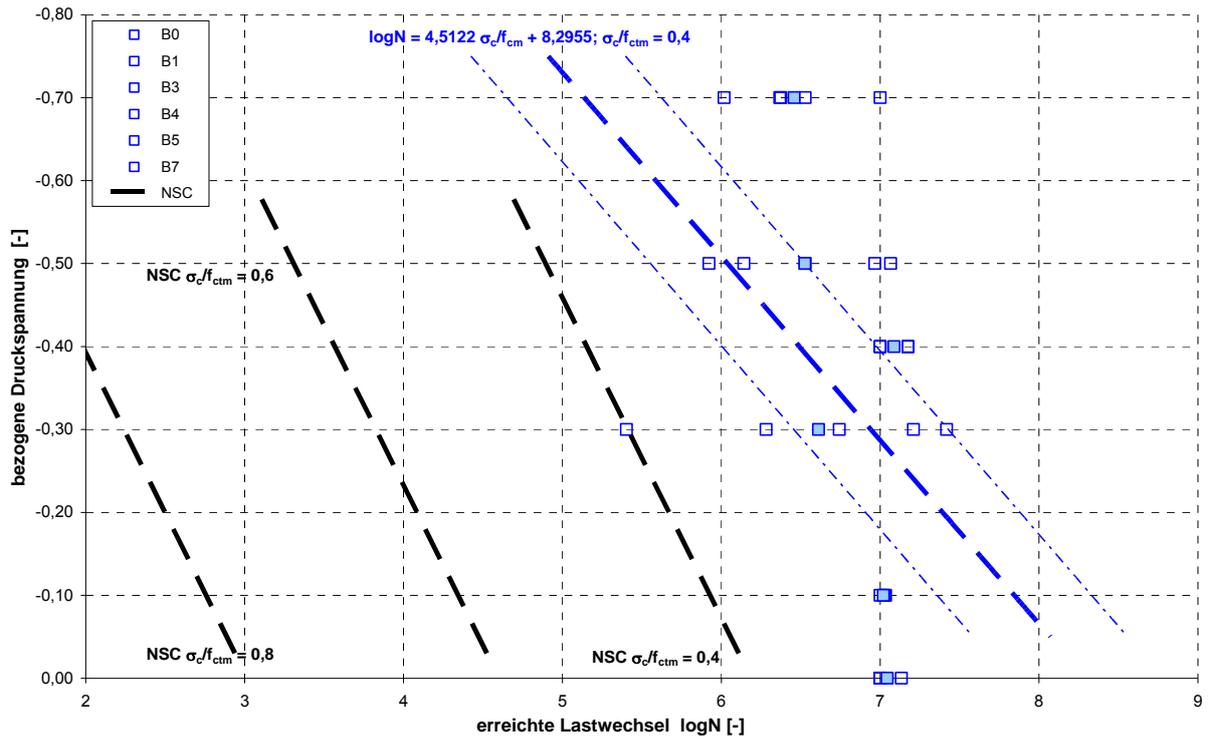


Bild 12.24: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)

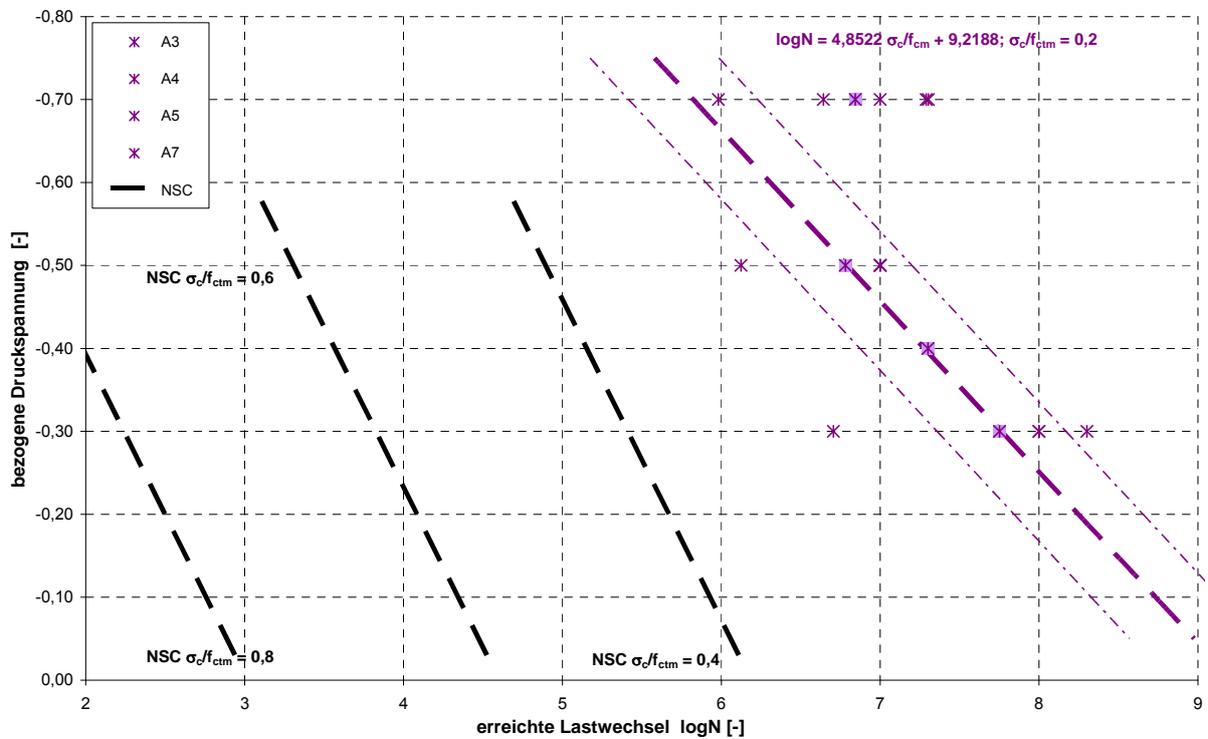


Bild 12.25: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (M2Q/M3Q mSF mWB (HV/MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$)

12.5.5 Wöhlerlinien für die Serie B5Q mSF mWB (BHV)

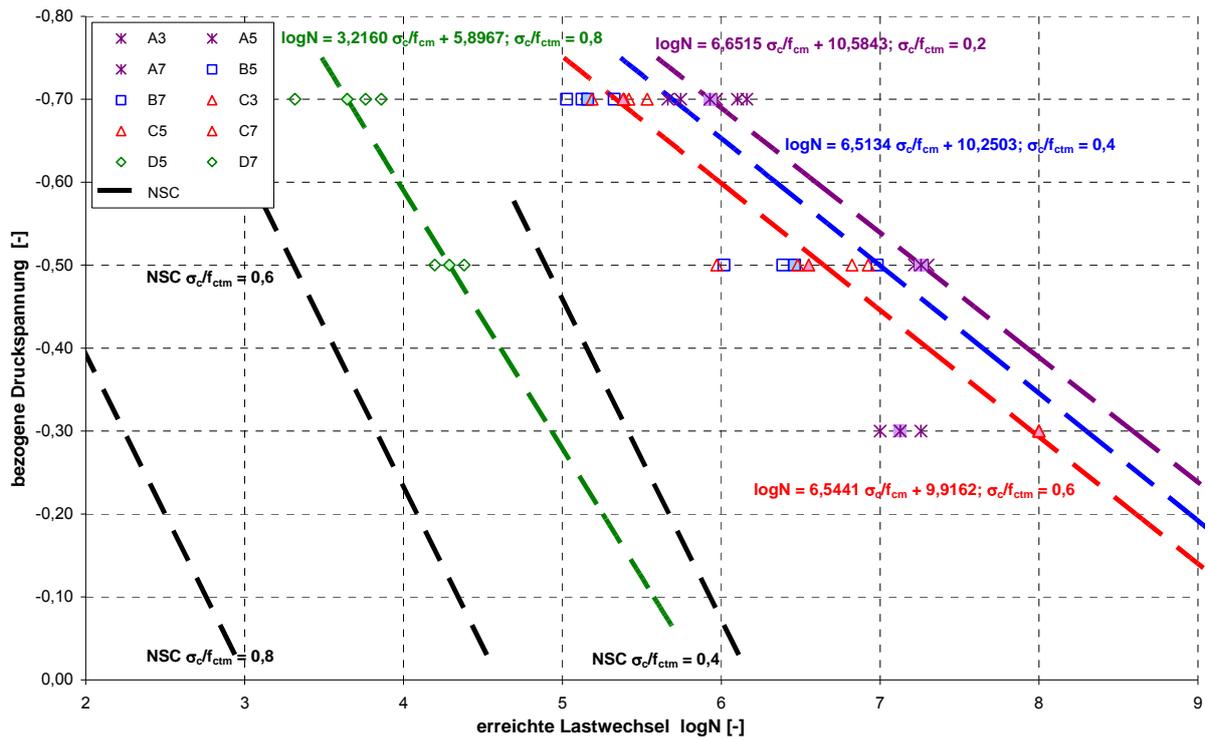


Bild 12.26: Wöhlerlinien des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV)), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$ bzw. $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$

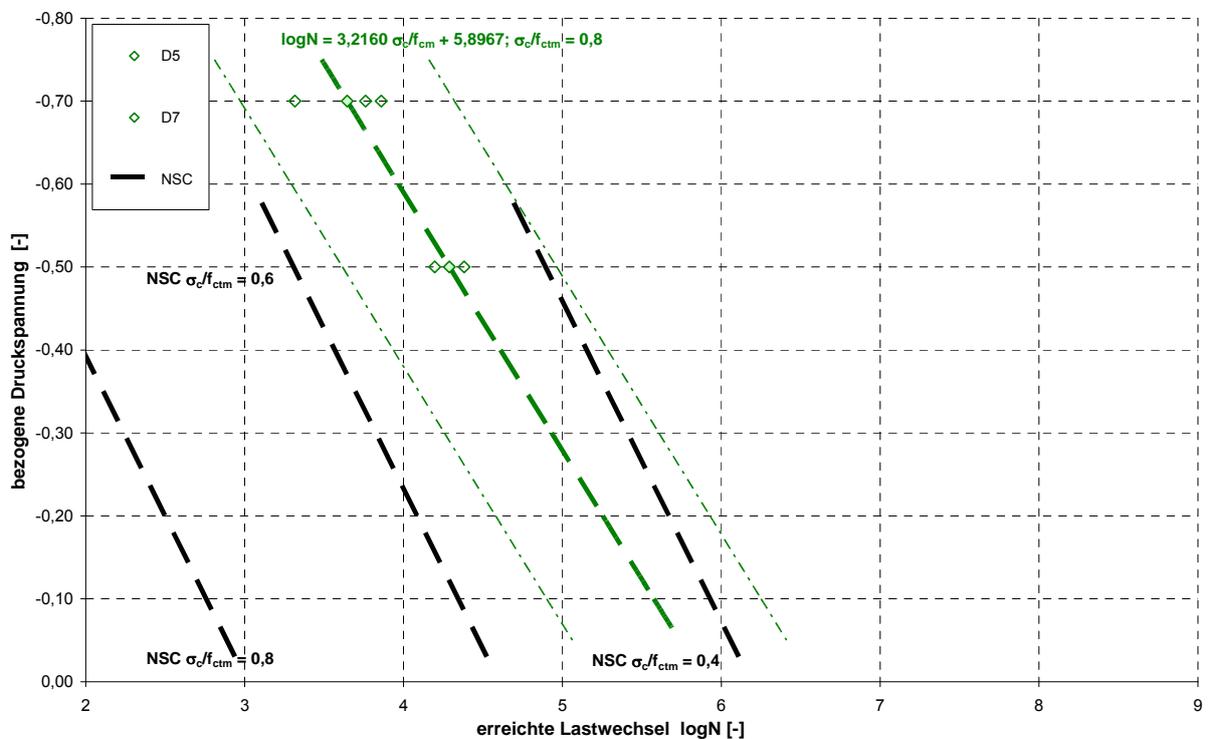


Bild 12.27: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (B5Q mSF mWB (BHV)), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$

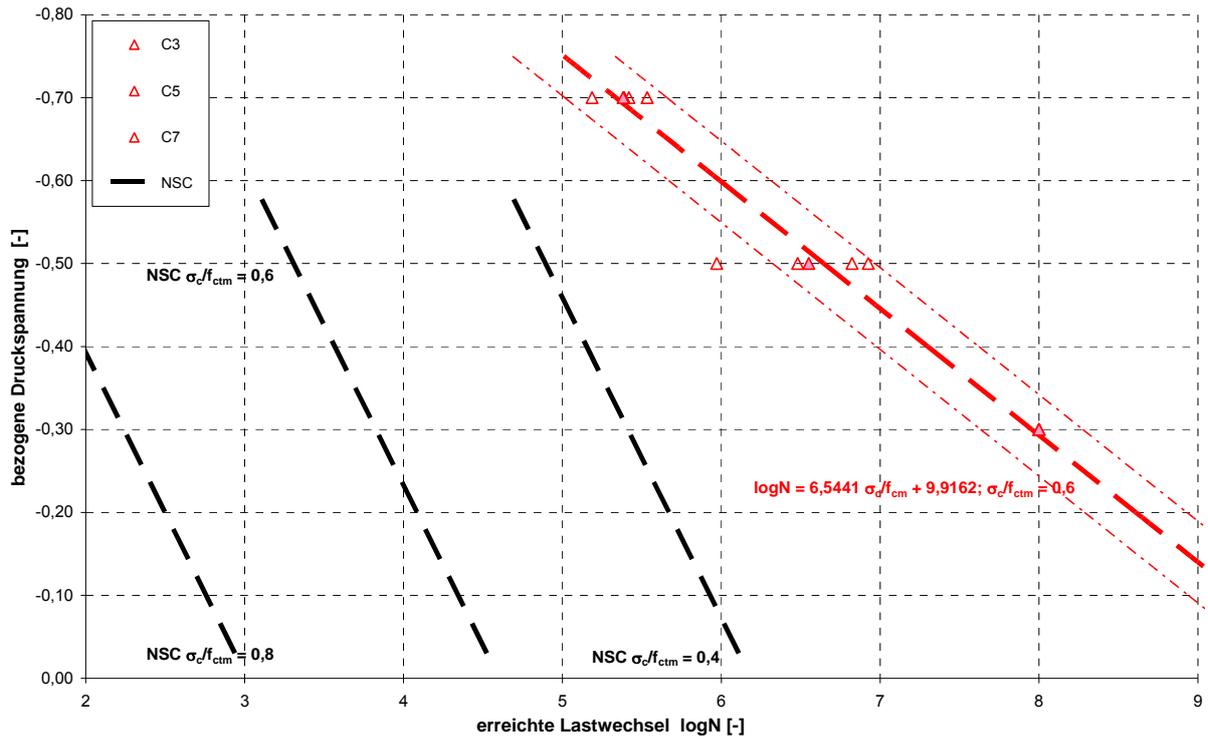


Bild 12.28: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$)

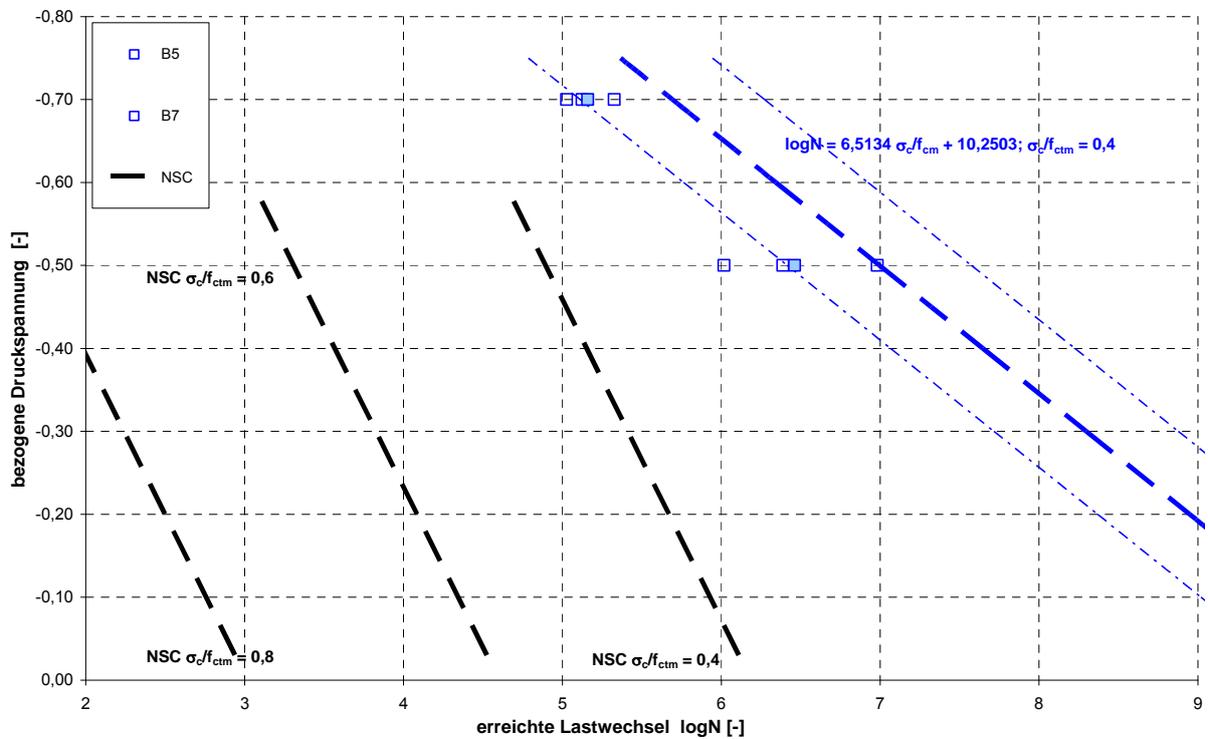


Bild 12.29: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$)

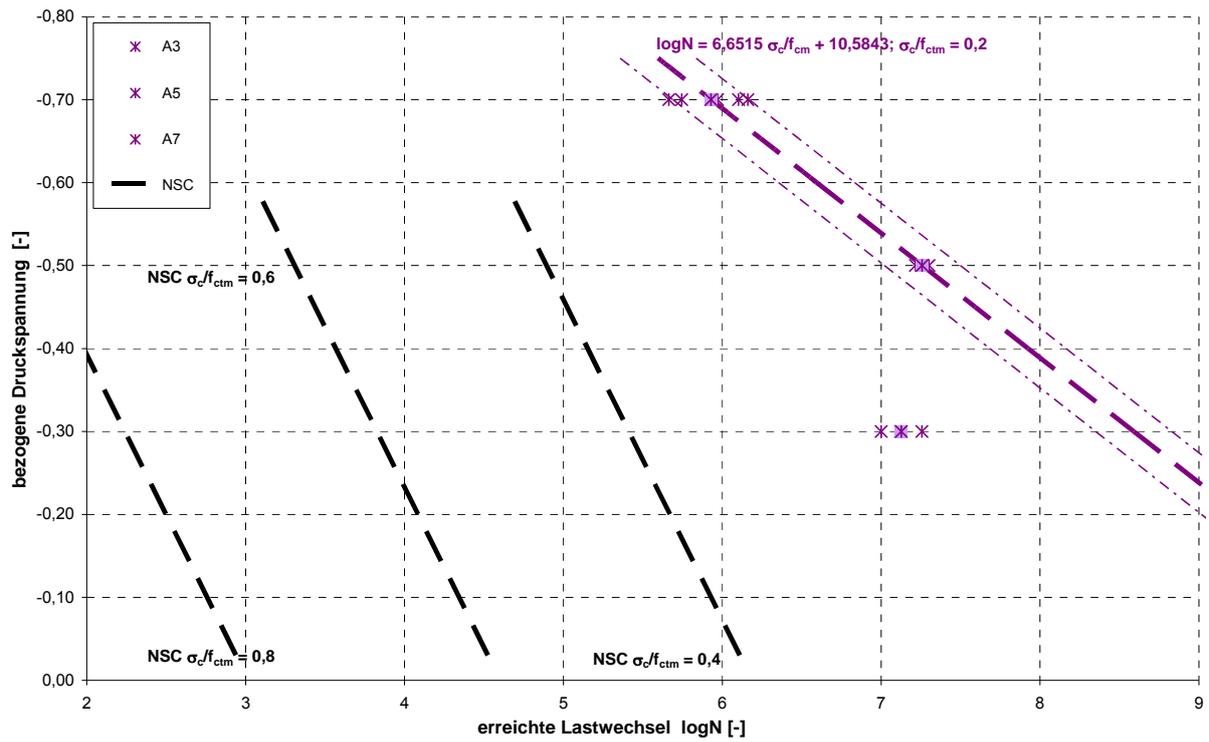


Bild 12.30: Wöhlerlinien des UHPC mit zug. Anteilsbereichen (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$)

12.6 Ergebnisse der statistischen Auswertung der Ermüdungsversuche

Tabelle 12.15: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Ermüdungsversuche

Bez.	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	logN	n	N	S_x	S_y	S_{xx}	S_{yy}	S_{xy}	\bar{x}	\bar{y}	Q_{xx}	Q_{yy}	Q_{xy}	s_x^2	s_y^2	s_{xy}	b_1	b_0	s^2	$k_{2u} \cdot s$
OF_B1	0,40	-0,10	6,76	7																		
OF_B3	0,40	-0,30	6,33	4																		
OF_B			6,54		11	-1,90	72,62	0,43	480,04	-12,33	-0,17	6,60	0,10	0,64	0,22	0,01	0,06	0,02	2,1187	6,9676	0,0070	0,2469
OF_C1	0,60	-0,10	6,04	4																		
OF_C3	0,60	-0,30	5,54	3																		
OF_C			5,79		7	-1,30	40,78	0,31	240,08	-7,40	-0,19	5,83	0,07	2,47	0,17	0,01	0,41	0,03	2,4643	6,2838	0,0281	0,6544
WB_B1	0,40	-0,10	6,88	3																		
WB_B3	0,40	-0,30	6,68	3																		
WB_B			6,78		6	-1,20	40,68	0,30	276,08	-8,08	-0,20	6,78	0,06	0,25	0,06	0,01	0,05	0,01	0,9703	6,9743	0,0113	0,4782
WB_C1	0,60	-0,10	5,86	5																		
WB_C3	0,60	-0,30	4,95	5																		
WB_C					10	-2,00	54,06	0,50	295,62	-10,35	-0,20	5,41	0,10	3,43	0,46	0,01	0,38	0,05	4,5830	6,3221	0,0222	0,4591
FO_B1	0,40	-0,10	6,72	4																		
FO_B3	0,40	-0,30	6,62	3																		
FO_B			6,67		7	-1,30	46,74	0,31	313,68	-8,65	-0,19	6,68	0,07	1,57	0,03	0,01	0,26	0,01	0,4971	6,7697	0,0067	0,3206
FO_C1	0,60	-0,10	5,73	5																		
FO_C3	0,60	-0,30	5,60	4																		
FO_C			5,67		9	-1,70	51,06	0,41	292,71	-9,58	-0,19	5,67	0,09	3,05	0,06	0,01	0,38	0,01	0,6824	5,8020	0,0085	0,3025

Bez.	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	logN	n	N	S_x	S_y	S_{xx}	S_{yy}	S_{xy}	\bar{x}	\bar{y}	Q_{xx}	Q_{yy}	Q_{xy}	s_x^2	s_y^2	s_{xy}	b_1	b_0	s^2	$k_{2u} \cdot s$
MHV_A3	0,20	-0,30	7,75	4																		
MHV_A4	0,20	-0,40	7,30	3																		
MHV_A5	0,20	-0,50	6,78	4																		
MHV_A7	0,20	-0,70	6,84	5																		
MHV_A			7,17		16	-4,40	80,03	1,84	586,29	-31,63	-0,40	7,28	0,08	3,98	0,39	0,01	0,40	0,04	4,8522	9,2167	0,0227	0,4059
MHV_B0	0,40	0,00	7,04	3																		
MHV_B1	0,40	-0,10	7,02	3																		
MHV_B3	0,40	-0,30	6,61	5																		
MHV_B4	0,40	-0,40	7,09	4																		
MHV_B5	0,40	-0,50	6,53	5																		
MHV_B7	0,40	-0,70	6,46	5																		
MHV_B			6,79		25	-9,40	168,52	4,82	1141,87	-62,28	-0,38	6,74	1,29	5,85	1,08	0,05	0,24	0,05	0,8425	7,0578	0,0397	0,4863
MHV_C0	0,60	0,00	6,99	3																		
MHV_C1	0,60	-0,10	5,33	6																		
MHV_C2	0,60	-0,20	6,74	4																		
MHV_C3	0,60	-0,30	5,73	6																		
MHV_C4	0,60	-0,40	5,55	5																		
MHV_C5	0,60	-0,50	4,14	8																		
MHV_C7	0,60	-0,70	4,60	5																		
MHV_C			5,58		37	-9,20	175,18	3,56	1000,26	-46,57	-0,29	5,47	0,92	41,24	3,79	0,03	1,33	0,12	4,1431	6,6656	0,0782	0,6318
MHV_D0	0,80	0,00	4,77	8																		
MHV_D1	0,80	-0,10	3,96	6																		
MHV_D			4,36		14	-0,60	61,88	0,06	301,26	-2,38	-0,04	4,42	0,03	27,77	0,28	0,00	2,14	0,02	8,0676	4,7656	0,0212	0,3885

Anlagen

Bez.	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	logN	n	N	S_x	S_y	S_{xx}	S_{yy}	S_{xy}	\bar{x}	\bar{y}	Q_{xx}	Q_{yy}	Q_{xy}	s_x^2	s_y^2	s_{xy}	b_1	b_0	s^2	$k_{2u} \cdot s$
BHV_A3	0,20	-0,30	7,13	3																		
BHV_A5	0,20	-0,50	7,26	2																		
BHV_A7	0,20	-0,70	5,93	5																		
BHV_A			6,77		10	-4,50	44,16	2,95	281,28	-28,01	-0,64	6,31	0,06	2,72	0,38	0,01	0,45	0,06	6,6515	10,5843	0,0054	0,2394
BHV_B5	0,40	-0,50	6,46	3																		
BHV_B7	0,40	-0,70	5,16	3																		
BHV_B			5,81		6	-3,60	34,86	2,22	205,62	-20,53	-0,60	5,81	0,6	3,07	0,39	0,01	0,61	0,08	6,5134	9,7182	0,0166	0,5799
BHV_C3	0,60	-0,30	8,00	2																		
BHV_C5	0,60	-0,50	6,55	4																		
BHV_C7	0,60	-0,70	5,38	5																		
BHV_C			6,64		11	-6,10	69,11	3,63	445,07	-36,74	-0,55	6,28	0,25	10,85	1,59	0,02	1,09	0,16	6,4195	9,8428	0,0108	0,3218
BHV_D5	0,80	-0,50	4,29	2																		
BHV_D7	0,80	-0,70	3,65	3																		
BHV_D			3,97		5	-3,10	19,51	1,97	76,84	-11,94	-0,62	3,90	0,05	0,68	0,15	0,01	0,17	0,04	3,2160	5,8967	0,0140	0,6746

12.7 Statistische Auswertung der Ermüdungsversuche in Abhängigkeit des Luftporengehaltes

Tabelle 12.16: Ergebnisse der Ermüdungsversuche in Abhängigkeit des Luftporengehaltes

M2Q oSF mWB (OF)	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	logN	s_x	v_x	LP	M3Q mSF mWB (MHV)	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	logN	s_x	v_x	LP
	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[%]		[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[%]
B1	0,4	-0,1	6,76	0,16	2,36	4,4	A3 (*)	0,2	-0,3	7,75	0,71	9,18	5,3
B3	0,4	-0,3	6,33	0,11	1,70	4,0	A4 (*)	0,2	-0,4	7,30	0,00	0,00	5,6
C1	0,6	-0,1	6,04	0,44	7,34	5,6	A5 (*)	0,2	-0,5	6,78	0,44	6,46	3,0
C3	0,6	-0,3	5,54	0,86	15,44	5,6	A7	0,2	-0,7	6,84	0,55	8,07	5,6
M2Q mSF mWB (FO)	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	logN	s_x	v_x	LP	B0 (*)	0,4	0,0	7,04	0,08	1,10	4,2
	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[%]	B1 (*)	0,4	-0,1	7,02	0,02	0,26	3,9
B1	0,4	-0,1	6,72	0,52	7,79	4,8	B3	0,4	-0,3	6,61	0,81	12,18	5,6
B3	0,4	-0,3	6,62	0,60	9,11	4,8	B4 (*)	0,4	-0,4	7,09	0,10	1,43	5,1
C1	0,6	-0,1	5,73	0,86	15,01	4,7	B5	0,4	-0,5	6,53	0,50	7,65	3,9
C3	0,6	-0,3	5,60	0,13	2,34	4,7	B7	0,4	-0,7	6,46	0,36	5,52	6,0
M2Q mSF oWB (WB)	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	logN	s_x	v_x	LP	C0 (*)	0,6	0,0	6,99	0,01	0,17	4,3
	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[%]	C1	0,6	-0,1	5,33	0,71	13,35	4,3
B1	0,4	-0,1	6,88	0,09	1,28	5,0	C2	0,6	-0,2	6,74	0,40	5,94	5,1
B3	0,4	-0,3	6,68	0,30	4,48	4,2	C3	0,6	-0,3	5,73	1,03	17,92	4,0
C1	0,6	-0,1	5,86	0,47	7,98	4,6	C4	0,6	-0,4	5,55	0,70	12,65	5,5
C3	0,6	-0,3	4,95	0,34	6,78	4,2	C5	0,6	-0,5	4,14	0,65	15,61	4,1
							C7	0,6	-0,7	4,60	0,14	3,10	4,8
							D0	0,8	0,0	4,77	0,97	20,42	4,3
							D1	0,8	-0,1	3,96	1,94	49,13	4,8
							B5Q mSF mWB (BHV)	σ_o/f_{ctm}	σ_u/f_{cm}	logN	s_x	v_x	LP
								[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[%]
							A3 (*)	0,2	-0,3	7,13	0,13	1,80	1,8
							A5 (*)	0,2	-0,5	7,26	0,06	0,83	1,6
							A7	0,2	-0,7	5,93	0,22	3,68	4,1
							B5	0,4	-0,5	6,46	0,49	7,53	1,6
							B7	0,4	-0,7	5,16	0,15	2,96	1,6
							C3 (*)	0,6	-0,3	8,00	0,00	0,00	2,3
							C5	0,6	-0,5	6,55	0,43	6,57	1,7
							C7	0,6	-0,7	5,38	0,13	2,33	1,8
							D5	0,8	-0,5	4,29	0,13	3,07	1,5
							D7	0,8	-0,7	3,65	0,29	7,96	1,5

(*) Diese Versuche bestanden zum größten Teil aus Durchläufern und werden nicht zur Auswertung verwendet

12.8 Schädigungsverläufe

12.8.1 Schädigungsverläufe für die Serie M3Q mSF mWB (MHV)

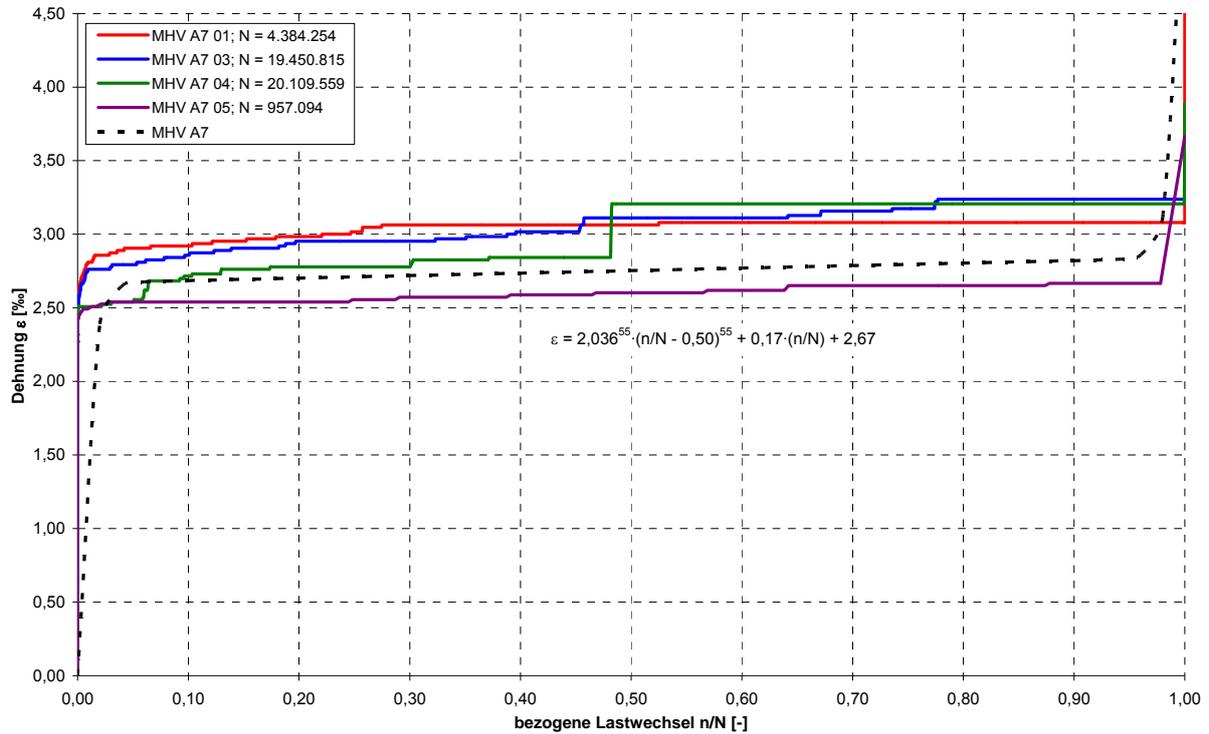


Bild 12.31: Schädigungsverlauf des UHPC (M3Q mSF mWB (MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)

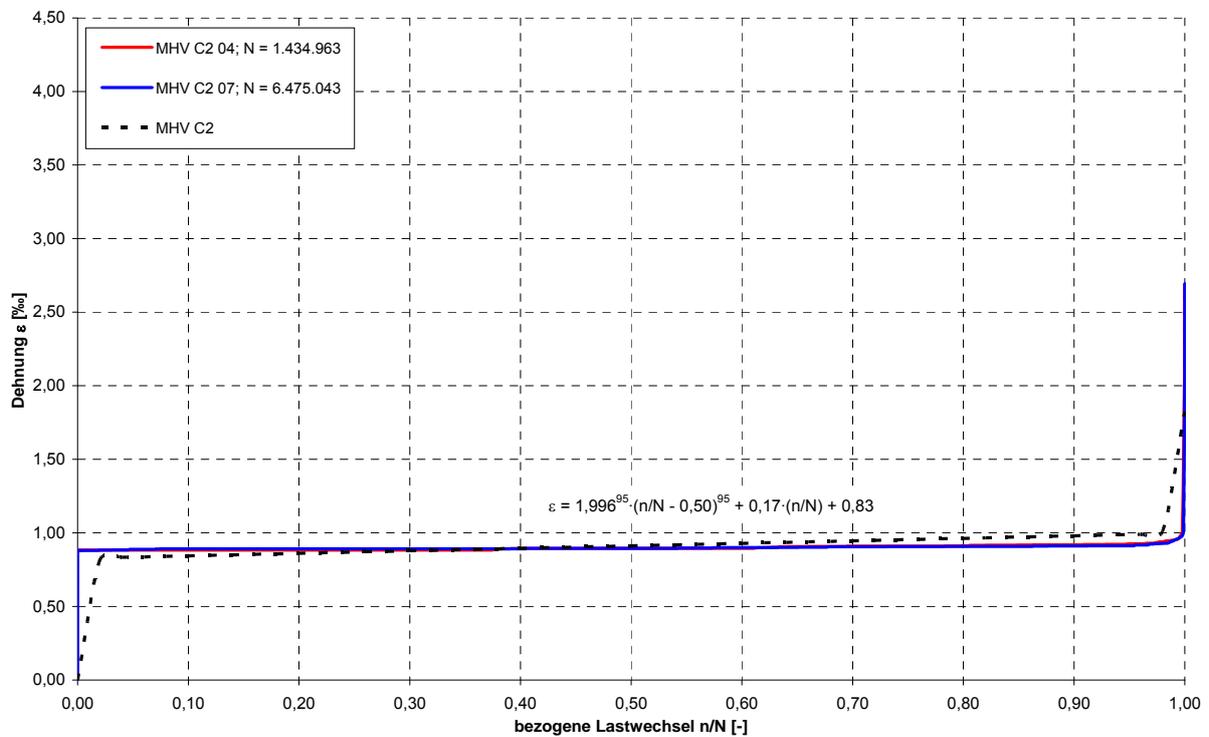


Bild 12.32: Schädigungsverlauf des UHPC (M3Q mSF mWB (MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,2$)

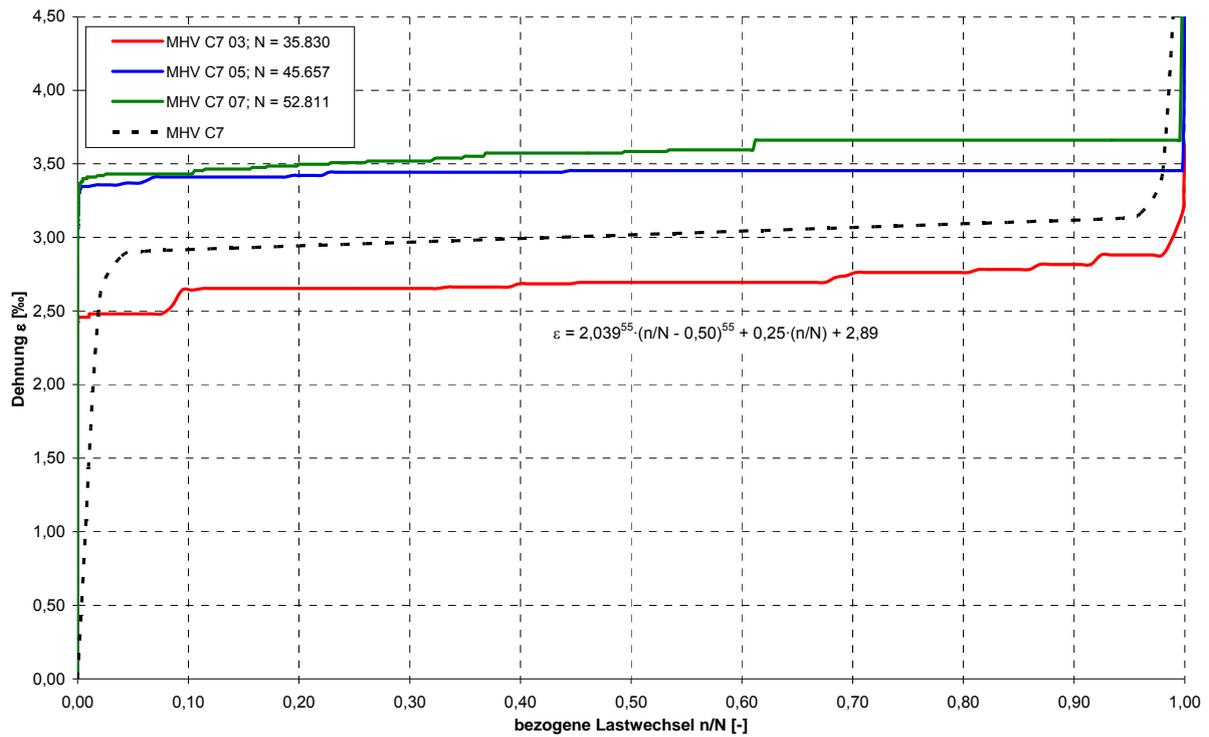


Bild 12.33: Schädigungsverlauf des UHPC (M3Q mSF mWB (MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)

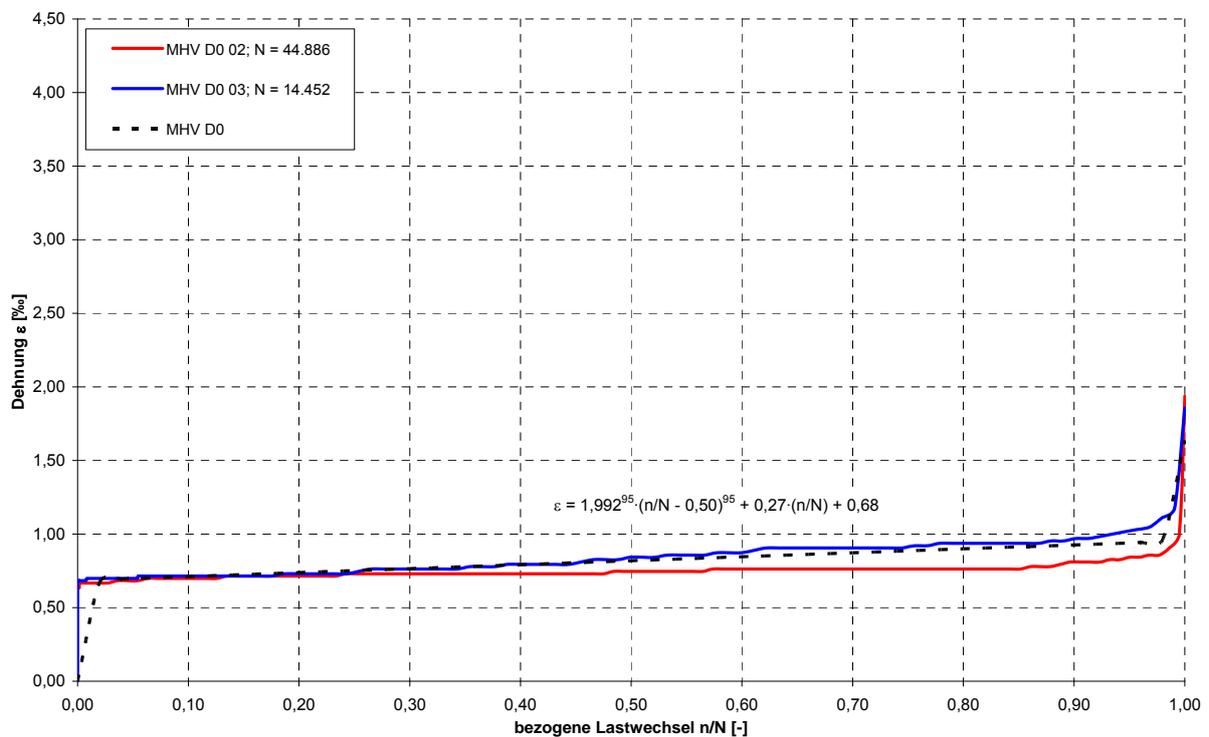


Bild 12.34: Schädigungsverlauf des UHPC (M3Q mSF mWB (MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{cm} = 0,0$)

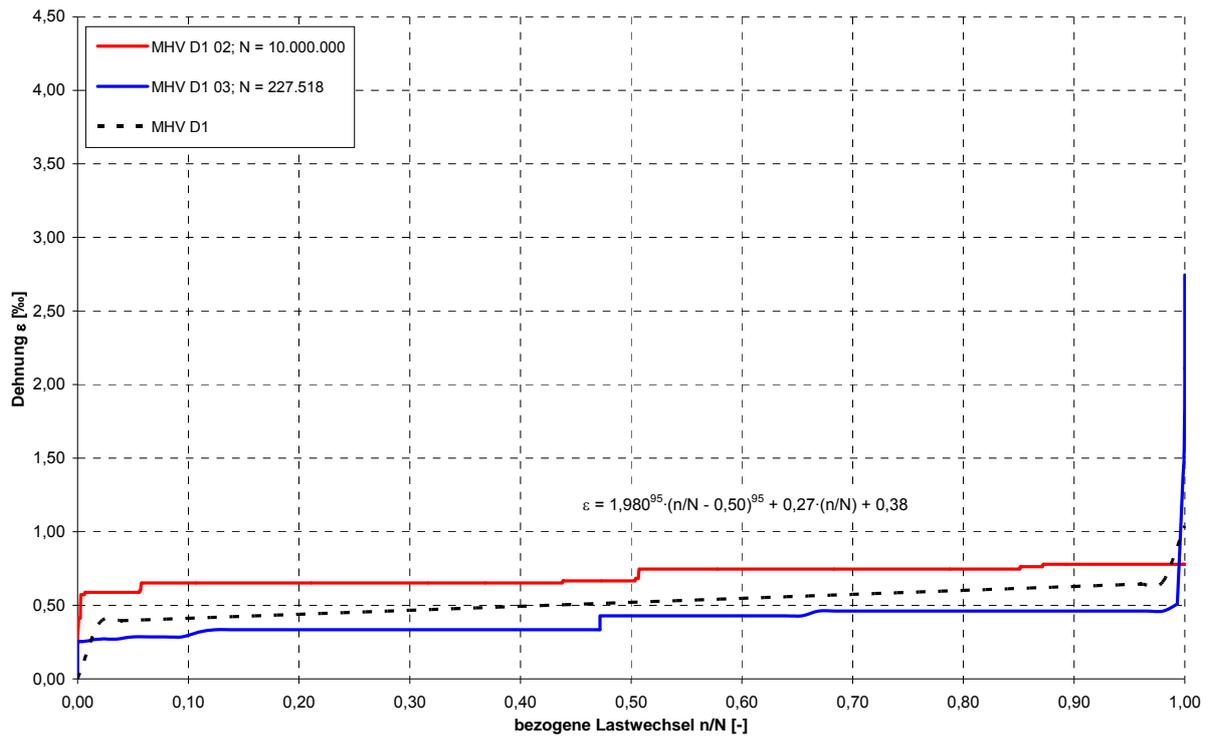
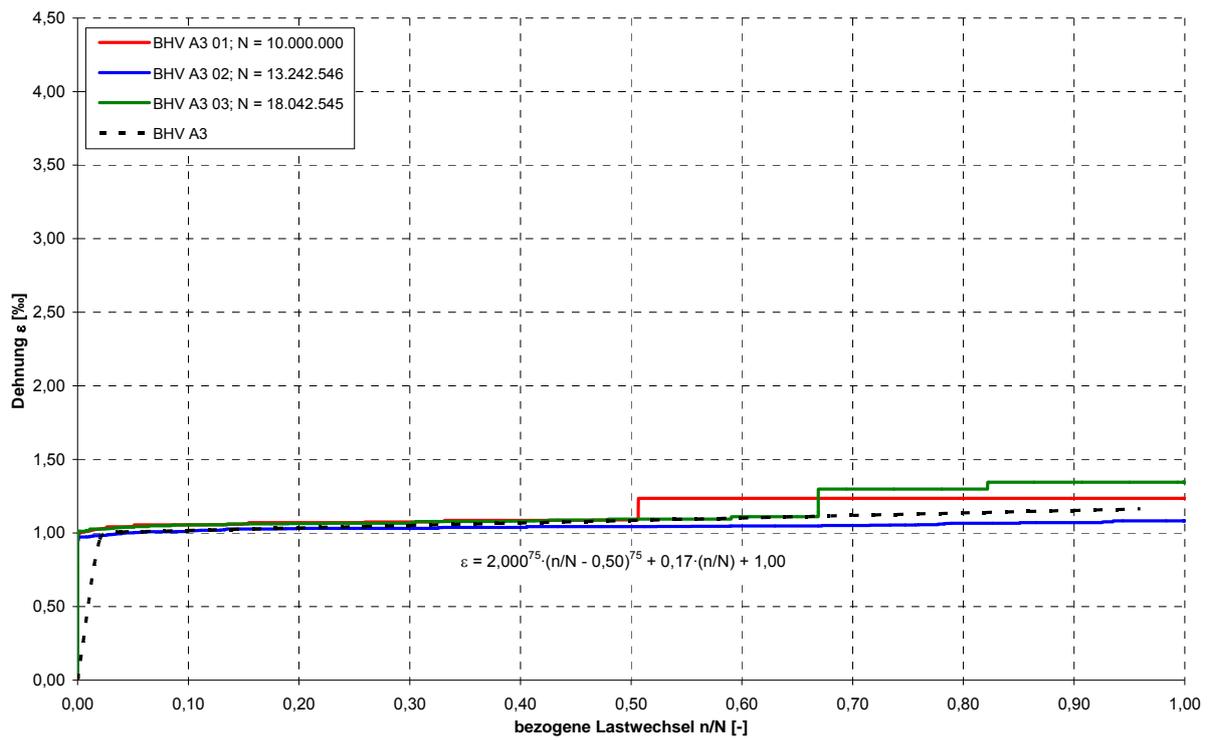
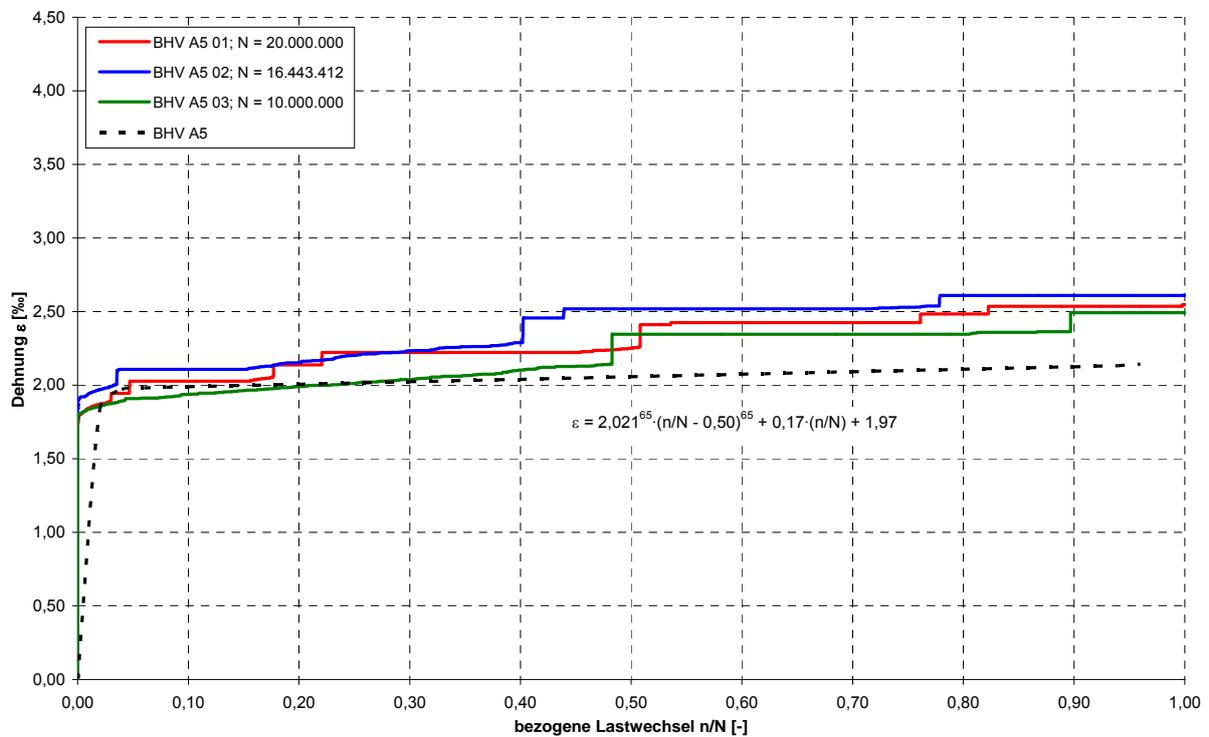


Bild 12.35: Schädigungsverlauf des UHPC (M3Q mSF mWB (MHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,1$)

12.8.2 Schädigungsverläufe für die Serie B5Q mSF mWB (BHV)

Bild 12.36: Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,3$)Bild 12.37: Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,5$)

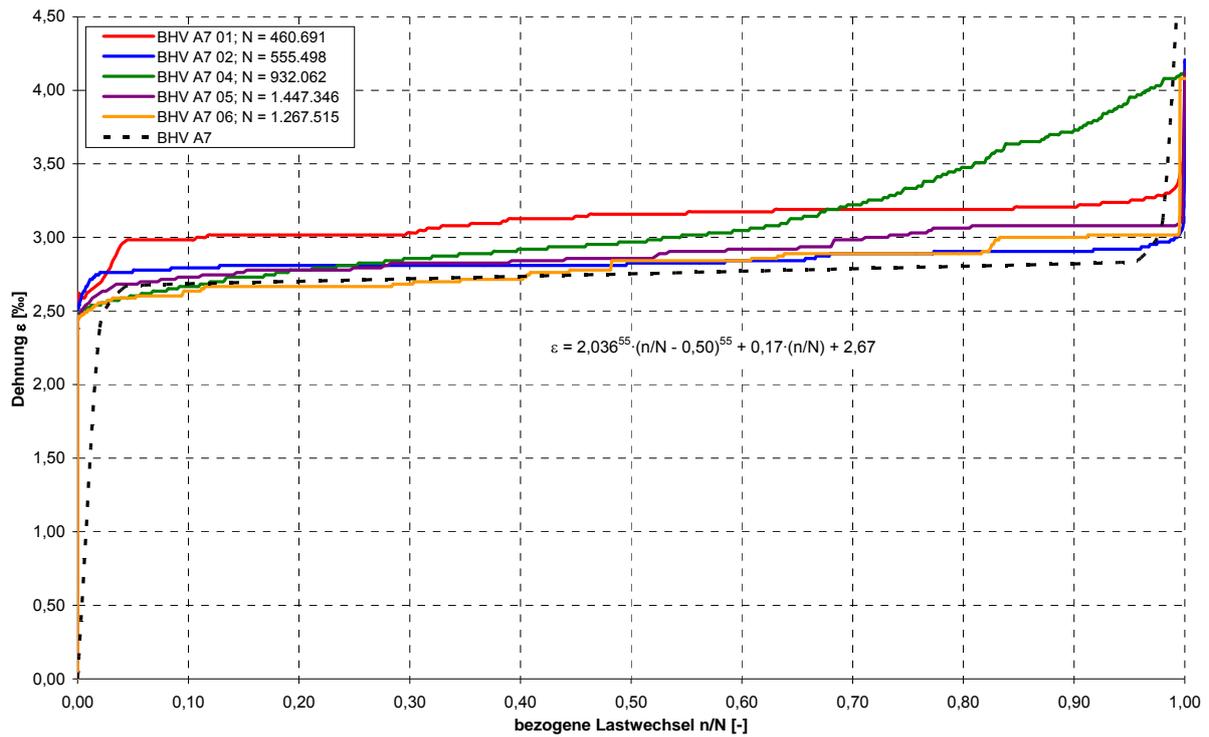


Bild 12.38: Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,2$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)

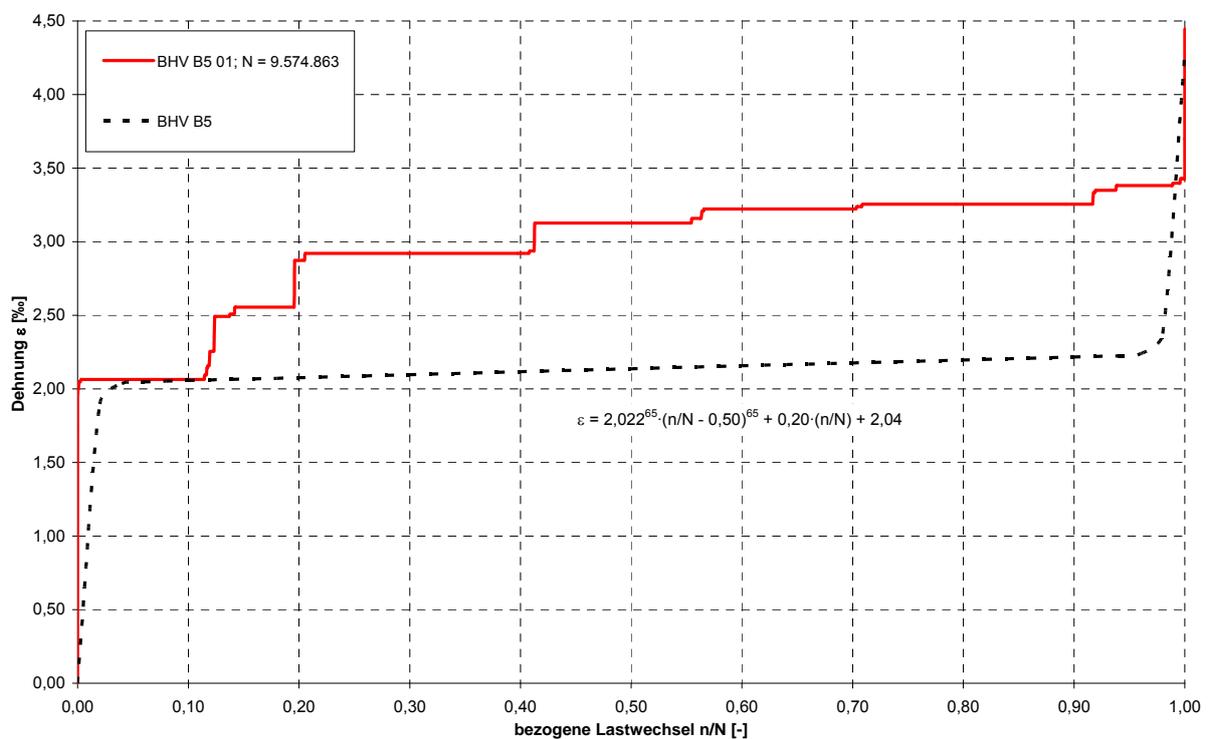


Bild 12.39: Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,5$)

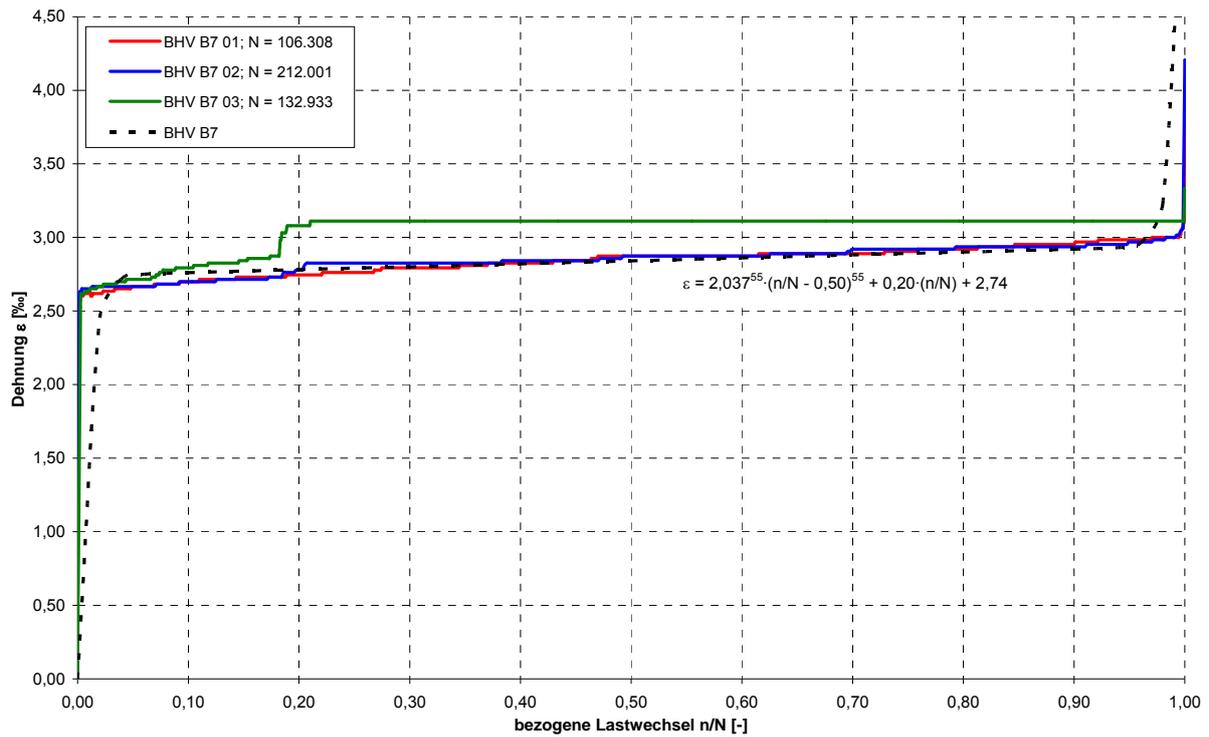


Bild 12.40: Schädungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,4$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)

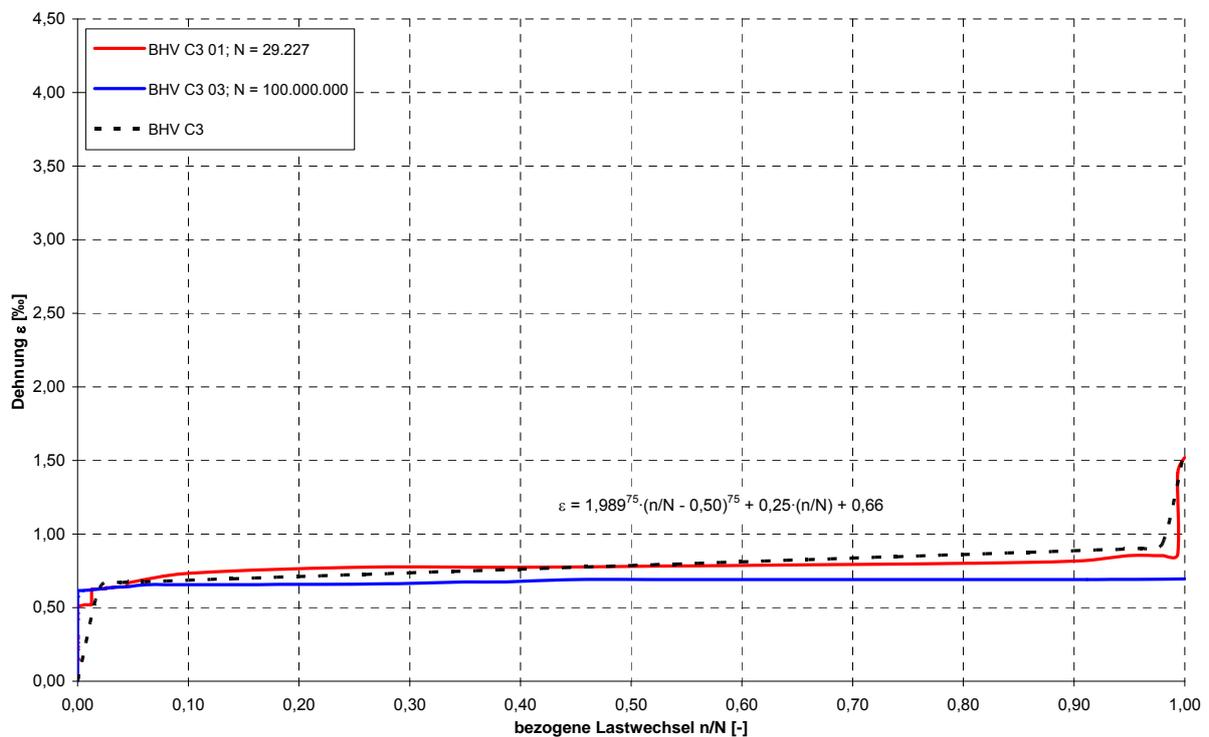


Bild 12.41: Schädungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,3$)

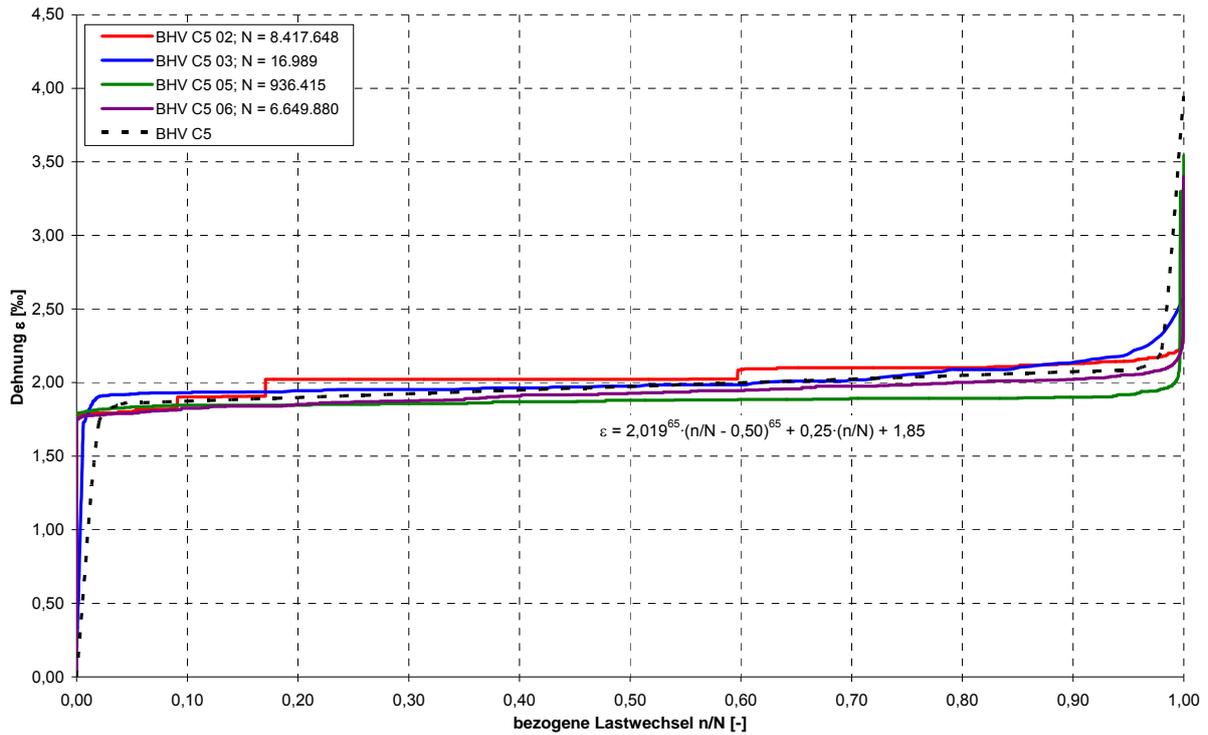


Bild 12.42: Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,5$)

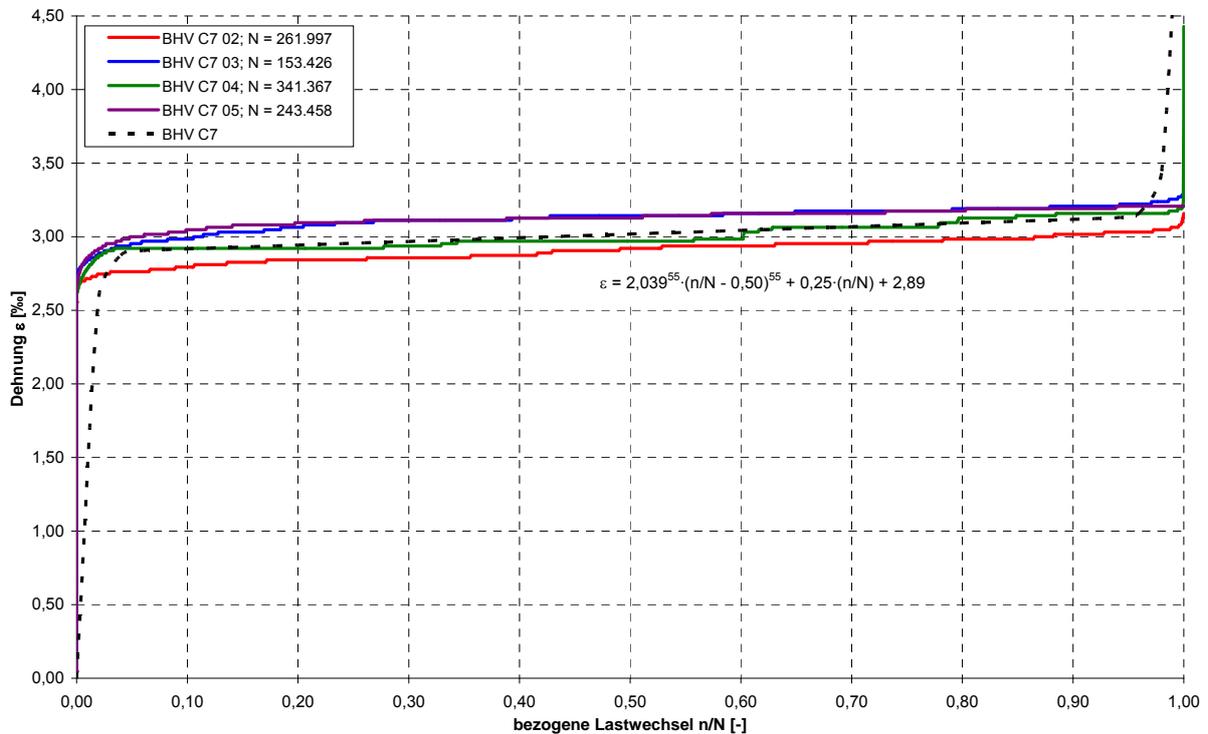


Bild 12.43: Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,6$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)

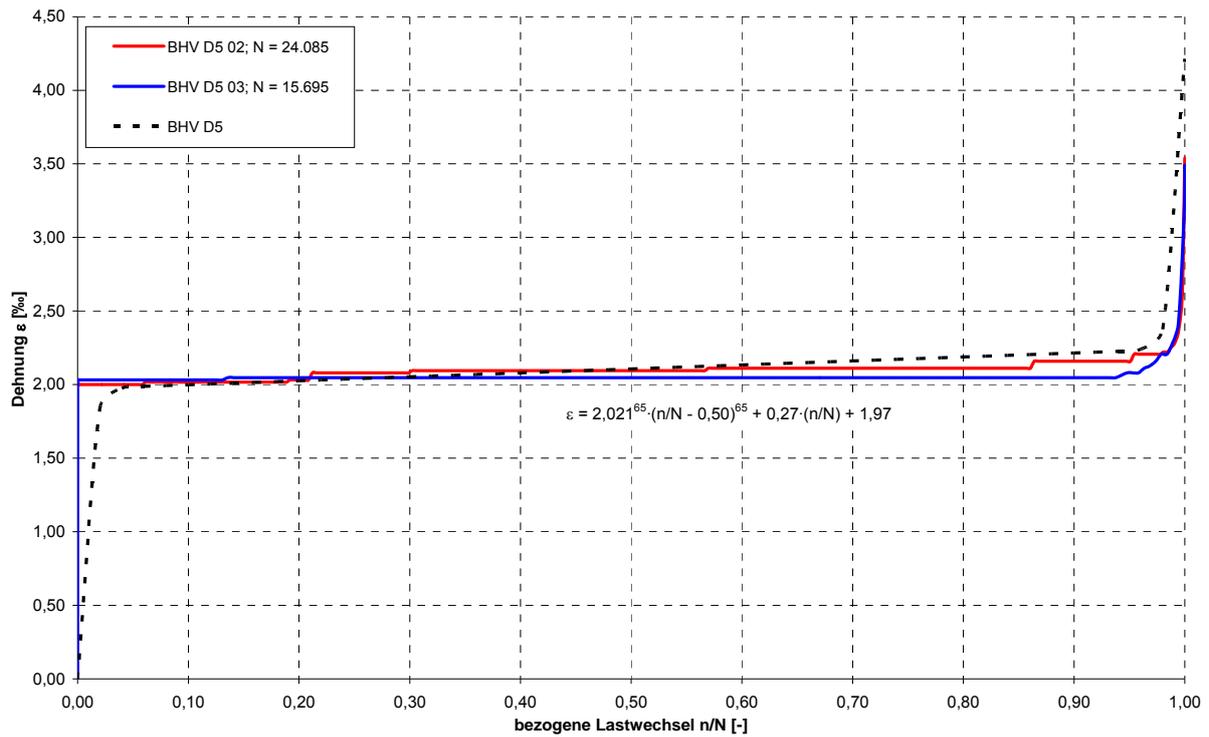


Bild 12.44: Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,5$)

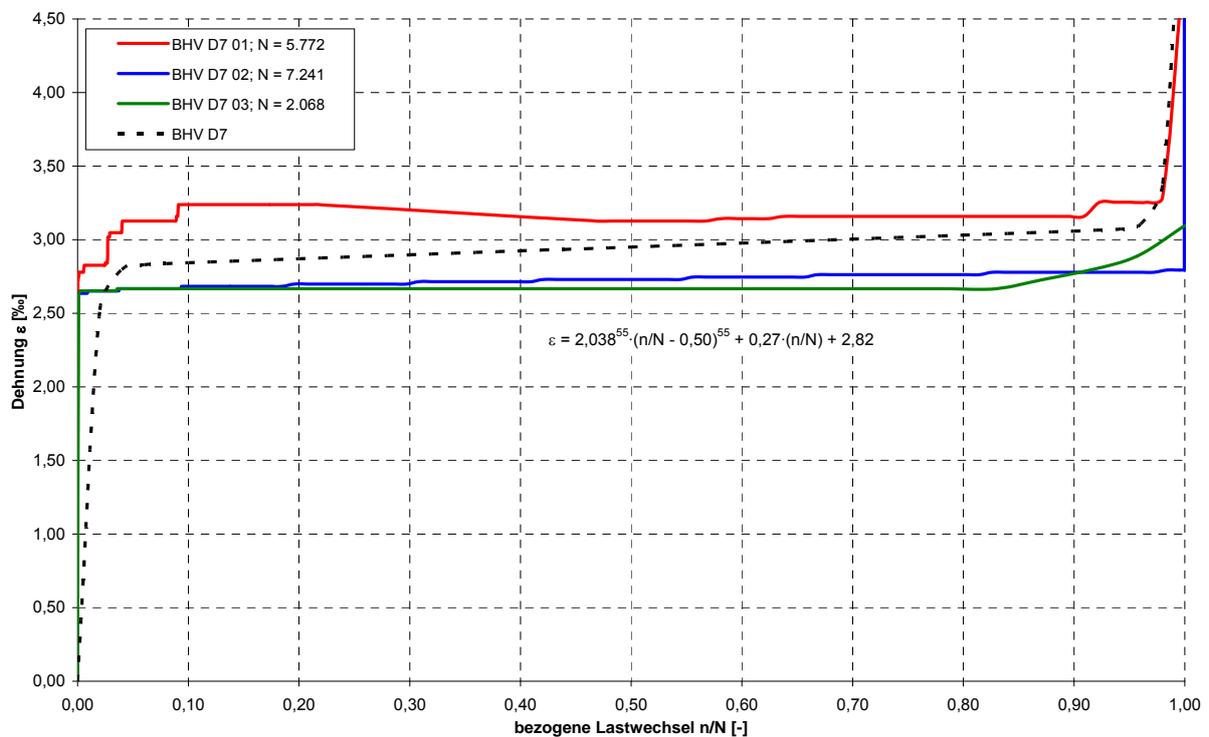


Bild 12.45: Schädigungsverlauf des UHPC (B5Q mSF mWB (BHV), $\sigma_c/f_{ctm} = 0,8$, $\sigma_c/f_{cm} = -0,7$)