

Diploma Thesis

Investigation on the Influence of Pre-Cracking Width on the Fatigue Behavior of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete under Cyclic Tensile Load

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Untersuchung des Einflusses der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von Ultrahochleistungsfaserbetonen unter Zugschwellbeanspruchung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Arber Shima, BSc.

Matr.Nr.: 01228571

unter der Anleitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. M.Eng. **Johann Kollegger**

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Philipp Preinstorfer, BSc.**

Institut für Tragkonstruktionen
Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/212-2, A-1040 Wien

Wien, im November 2021

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle die Gelegenheit dazu nutzen, mich bei all jenen zu bedanken, die mich sowohl bei der Erstellung dieser Diplomarbeit als auch während meiner Studienzeit tatkräftig unterstützt haben.

Besonders danken möchte ich O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. M.Eng. Johann Kollegger für die Möglichkeit, dass ich in dem „Institut für Tragkonstruktionen Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau“ meine Diplomarbeit anfertigen konnte.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei meinem Diplomarbeitsbetreuer Dipl.-Ing. Dr.techn. Philipp Preinstorfer, BSc. bedanken, der stets Interesse für meine Fragestellung zeigte und mich immer wieder mit der richtigen Hilfestellung auf den richtigen Weg führte und mir bei den experimentellen Untersuchungen immer zur Seite stand.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mich auf meinem Weg bis zu diesem Abschluss immer begleitet, unterstützt und mir immer wieder Zuversicht gegeben haben.

Ebenso danke ich meiner Freundin Hannah, für ihre aufbauenden Worte und dass sie mich bei jedem Schritt in meinem Leben unterstützt.

Danke auch an Dr. Helmut Buschmann, der mir immer wichtige Ratschläge gibt und ein offenes Ohr für meine Sorgen hat.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meinem ehemaligen Arbeitsgeber Dr. Norbert Handler bedanken, der mir stets den nötigen Freiraum für die Fertigstellung dieser Arbeit und der Durchführung der experimentellen Untersuchungen gab.

Kurzfassung

Die Notwendigkeit der Instandsetzung von Verkehrsinfrastrukturbauten wie Straßen- und Bahnbrücken ist infolge der zunehmenden Mobilität stark gestiegen. Die Fahrbahnplatten von Brücken werden höheren dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt. Die Aufbringung von Ultra High-Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) Schichten auf den bereits existierenden Fahrbahnplatten stellen eine Ertüchtigungsmethode dar, die im Vergleich zum konventionellen Stahlbeton geringere Bauhöhen ermöglicht. Es ist davon auszugehen, dass in diesen Aufbetonschichten aufgrund von z.B. Schwinden oder thermischen Gradienten Risse entstehen. Die Fasern in diesen Ultrahochleistungsbetonen weisen rissüberbrückende Eigenschaften auf. Damit ist eine Zugkraftübertragung über den Riss möglich.

Um die Sicherheit eines Infrastrukturbauwerkes über die Lebensdauer gewährleisten zu können, ist die Kenntnis der Ermüdungsfestigkeit solcher Bauteile von Bedeutung. Der Fokus der vorliegenden Diplomarbeit liegt darin, neue Erkenntnisse über den Einfluss der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung zu schaffen. Dazu wurden experimentelle Untersuchungen an vorgerissenen (*Pre-Cracked*) Versuchskörpern durchgeführt. Die untersuchten Versuchskörper wurden nach Betonrezepturen hergestellt, welche im Rahmen der UHPC-Richtlinienerstellung von der Österreichischen Bautechnikvereinigung (ÖBV) entwickelt wurden. Es handelt sich um zwei UHPFRC-Feinkorn-Rezepturen, die einen unterschiedlichen Fasergehalt und daraus resultierend, eine unterschiedliche Zugtragfähigkeit und ein unterschiedliches Nachbruchverhalten aufweisen. Die experimentellen Untersuchungen beinhalten Untersuchungen an Versuchskörpern mit unterschiedlichen eingepprägten Rissbreiten vor dem Aufbringen der eigentlichen Ermüdungsbeanspruchung mit einer maximalen Lastwechselobergrenze N von 2×10^6 . Die erhaltenen Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen wurden anhand von Wöhlerdiagrammen, „Cycle Creep Cruves“ und Fraktographie ausgewertet und durch die im Rahmen einer ausführlichen Literaturrecherche über den Stand der Technik gewonnen Erkenntnisse beschrieben und beurteilt.

Die zentrale Erkenntnis, die im Rahmen dieser Diplomarbeit gewonnen werden konnte, war, dass der Übergang von Phase II in die Phase III des Schädigungsverlaufes von UHPFRC unter Ermüdungsbeanspruchung mit dem Beginn des *Strain-Softening* Bereiches der statischen Kurve übereinstimmt. Bezüglich des Einflusses der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung zeigten die

experimentellen Untersuchungen, dass die Erhöhung der Rissbreite eine Reduzierung des Ermüdungswiderstandes von UHPFRC zur Folge hat.

Abstract

The necessity for restoration of the transport infrastructures such as road and rail bridges has risen sharply due to increase in mobility. As a result, deck slabs of bridges are exposed to higher dynamic loads. The application of (Ultra High-Performance Fibre Reinforced Concrete) UHPFRC layers on the existing deck slabs represent a rehabilitation method that enables lower construction heights compared to conventional reinforced concrete. It can be assumed that cracks develop in these concrete layers due to e.g., shrinkage or thermal gradients. The fibres in these Ultra High-Performance concretes have crack-bridging properties. This enables tensile forces to be transmitted across the crack.

In order to be able to guarantee the safety of an infrastructure over its service life, the knowledge of the fatigue strength of such construction components is important. The focus of the present thesis is to gain new knowledge on the influence of the crack width on the fatigue behaviour of UHPFRC under cyclic tensile load. For this purpose, experimental investigation was carried out on pre-cracked test specimens. The investigated specimens were manufactured according to concrete mixtures that were developed within the framework of creation of a guideline for UHPC by the Austrian Construction Technology Association (Österreichische Bautechnikvereinigung (ÖBV)). The chosen mixtures are two UHPFRC fine grained mixtures with different fibre content and, as a result, different tensile strengths and different post-cracking behaviour. The experimental investigations include investigations on specimens with different crack widths before application of the fatigue stress with a maximum load cycle limit N of 2×10^6 . The results obtained from the experimental investigations are evaluated on the basis of Wöhler Diagrams, Cycle Creep Curves and Fractography and are described and assessed using the knowledge gained from an extensive literature research on the State of the Art.

The core finding that could be gained through this experimental investigation is that the transition from phase II to phase III of the damage progression of UHPFRC under fatigue stress coincides with the beginning of the *Strain-Softening* area of the static curve. With regard to the influence of the *Pre-Cracking* width on the fatigue behaviour of UHPFRC under cyclic tensile load, the experimental investigations showed that an increase of the crack width results in a reduction of the fatigue resistance.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung und Methodik.....	2
1.3 Abgrenzung.....	3
2 Stand der Technik	4
2.1 UHPFRC.....	4
2.1.1 Betontechnologie.....	5
2.1.2 Zugverhalten von UHPFRC	6
2.1.3 Ermüdung von UHPFRC.....	7
2.1.3.1 Allgemein	8
2.1.3.2 Wöhlerkurven und deren Bestimmung	9
2.1.3.2.1 Versuchskonzept Makita und Brühwiler	10
2.1.3.2.2 Versuchskonzept Plizzari et al.	12
2.1.3.2.3 Versuchskonzept Carlesso et al.	14
2.1.3.3 Cycle Creep Curves.....	15
2.1.3.4 Fraktographie	17
3 Experimentelle Untersuchungen	20
3.1 Betonrezepturen.....	20
3.2 Geometrie der Probekörper	21
3.3 Herstellung der Probekörper.....	22
3.4 Versuchsaufbau und Messeinrichtungen	24
3.5 Statische Versuche	26
3.6 Dynamische Versuche.....	28
3.6.1 Allgemein.....	28
3.6.2 Messergebnisse	30
3.6.3 Wöhlerlinien.....	31
3.6.4 Cycle Creep Curves	35
3.6.5 Bruchbild der Ermüdungsversuche unter Zugschwellbeanspruchung	37
3.6.6 Post-Dynamisches Verhalten.....	40

3.6.7	Interpretation der Ergebnisse.....	41
4	Beurteilung des Einflusses der Rissbreite auf das Ermüdungsverhaltens von UHPFRC.....	42
4.1	Auswertung anhand der Cycle Creep Curves	42
4.2	Auswertung anhand der Wöhlerdiagramme	46
5	Zusammenfassung.....	50
5.1	Methodik und Ergebnisse.....	50
5.2	Ausblick.....	53
	Literaturverzeichnis.....	54
	Anhang A.....	57
A.1	Betoniercharge FM-Rezeptur	57
A.2	Betoniercharge FH-Rezeptur.....	58
	Anhang B.....	59
B.1	Versuch S1 FM.....	59
B.2	Versuch D1 FM 55.26 PC 0.4.....	60
B.3	Versuch D2 FM 58.71 PC 0.4.....	61
B.4	Versuch D3 FM 55.26 PC 1.2.....	62
B.5	Versuch D4 FM 58.71 PC 0.2.....	63
B.6	Versuch LA FM 43.68 PC 0.2.....	64
B.7	Versuch S1 FH.....	65
B.8	Versuch D1 FH 67.47 PC 0.6	66
B.9	Versuch D2 FH 67.47 PC 0.2	67
B.10	Versuch D3 FH 67.47 PC 0.3.....	68
B.11	Versuch D4 FH 56.52 PC 0.4.....	69
B.12	Versuch LA FH 56.52 PC 0.2	70

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen und Sonderzeichen

E-Modul	Elastizitätsmodul
FPZ	Fracture Process Zone (dt.: Bruchprozesszone)
FRC	Fibre Reinforced Concrete (dt.: Faserbeton)
HSC	High Strength Concrete (dt.: hochfester Beton)
NSC	Normal Strength Concrete (dt.: normalfester Beton)
ÖBV	Österreichische Bautechnikvereinigung
UHPFRC	Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (dt.: Faserbewehrter Ultrahochleistungsbeton)
W/B-Wert	Wasser-Bindemittelwert
W/Z-Wert	Wasser-Zementwert

Kleine lateinische Buchstaben

dw/dn	Rissöffnungsrate
f_c	Würfeldruckfestigkeit
f_{ct}	Biegezugfestigkeit
f_e	Erstrissfestigkeit
f_u	Zugfestigkeit
k_1	Reduzierungskoeffizient
k_2	Erhöhungskoeffizient
n	tatsächlich vorhandene Lastwechselzahl
n/N	bezogene Lastwechselzahl
$n/N^{I/II}$	bezogene Lastwechselzahl beim Phasenübergang I/II
$n/N^{II/III}$	bezogene Lastwechselzahl beim Phasenübergang II/III

Große lateinische Buchstaben

CMOD	Crack Mouth Opening Displacement (dt.: Rissöffnungsverschiebung)
CMOD _f	Crack Mouth Opening Displacement at Failure (dt.: Rissöffnungsverschiebung beim Bruch)
CMOD _i	Crack Mouth Opening Displacement at i-Cycle (dt.: Rissöffnungsverschiebung beim i-Lastzyklus)
CMOD _{i, 0.5}	Crack Mouth Opening Displacement 0.5 mm (dt.: Rissöffnungsverschiebung 0.5 mm)
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
N	Lastwechselzahl
P _{inf}	Unterlast für Ermüdungsversuche
P _{low}	Lower Load for Fatigue Test (dt.: Unterlast für Ermüdungsversuche)
P _{max}	Peak Load (dt.: max. Last)
P _{max,i}	Peak Load at i-Cycle (dt.: max. Last beim i-Lastzyklus)
P _{Res,Cycl}	Resttragfähigkeit
P _{sup}	Oberlast für Ermüdungsversuche
P _{upp}	Upper Load for Fatigue Test (dt.: Oberlast für Ermüdungsversuche)
P _{0.5mm}	Kraft bei der Rissöffnung von 0.5 mm
S	bezogene Oberspannung
S _D	Dauerschwingfestigkeit

Griechische Buchstaben

ε	Dehnung
ε _e	Elastische Grenzdehnung
σ	Spannung
δ	Verformung

Abbildungsverzeichnis

1.1: Gliederung der Diplomarbeit	2
2.1: Vergleich von UHPFRC bezüglich seiner Festigkeit und Steifigkeit mit anderen Werkstoffen	6
2.2: Schematische Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung von UHPFRC-Probekörper unter quasi-statischer Zugbeanspruchung	7
2.3: Schematische Darstellung der Ermüdungsfestigkeit von Beton anhand der Wöhlerlinie sowie Veranschaulichung des zugrunde liegenden und während der Lebensdauer ablaufenden Ermüdungsvorganges	9
2.4: Schematische Darstellung des quasi-statischen Verhaltens von UHPFRC-Versuchskörpern unter Zugbeanspruchung und Definition der dynamischen Zugversuche	11
2.5: Belastungsgeschichte für die Ermüdungsversuche nach Plizzari et al.	13
2.6: Belastungsgeschichte für die Ermüdungsversuche nach Carlesso et al.	14
2.7: Schematische Darstellung einer Cycle Creep Curve	15
2.8: Qualitative Darstellung des Schädigungsverlaufes von normal-, hochfestem- und ultrahochfestem Beton	16
2.9: Snubbing	18
2.10: Mechanismus der Tribokorrosion: (a) Herausziehen und Zurückrutschen der Fasern durch dynamische Beanspruchung (b) Ablösung des Haftverbundes zwischen Fasern und Matrix sowie die Abnutzung der Fasern	19
3.1: Geometrie der UHPFRC-Versuchskörper	22
3.2: Setzfließmaß: (a) FM Rezeptur (b) FH Rezeptur	23
3.3: Betonage: (a) Würfel und Prismen zur Festigkeitsbestimmung (b) Probekörper	24
3.4: Versuchsaufbau für die Ermüdungsversuche	25
3.5: Eingebauter Probekörper	26
3.6: Spannung – Dehnungs-Diagramm der statischen Zugversuche	27
3.7: Belastungsgeschichte in den Ermüdungsversuchen	29
3.8: Wöhlerdiagramm der Rezeptur FM	32
3.9: Wöhlerdiagramm der Rezeptur FM – ohne Berücksichtigung des Versuchskörpers D5 FM	33
3.10: Wöhlerdiagramm der Rezeptur FH	34
3.11: Cycle Creep Curves für die FM -Versuchsreihe	35
3.12: Cycle Creep Curve für die FH – Versuchsreihe	36
3.13: Versagen der Versuchskörper unter Zugschwellbeanspruchung (a) Versuchskörper D4 FM (b) Versuchskörper FH LA	38
3.14: Bruchfläche mit Snubbing – Versuchskörper D2 FM	38

3.15: Bruchfläche mit Tribokorrosion – Versuchskörper D1 FM	39
3.16: Bruchbild des Versuchskörpers D3 FH.....	40
3.17: Spannungs–Dehnungs-Linie der Versuchskörper LA FM vor und nach der dynamischen Belastung.....	40
4.1: Position der Wegaufnehmer an UHPFRC Versuchskörper.....	43
4.2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Rezeptur FM	45
4.3: Spannung-Dehnungs-Diagramm der Rezeptur FH	46
4.4: Wöhlerdiagramm für die Beurteilung des Einflusses der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung.....	48

Tabellenverzeichnis

2.1: Übergangsphasen im Schädigungsverlauf von Normalbeton (NSC), hochfestem Beton (HSC) und ultrahochfestem Beton (UHPC) in Prozent der ertragbaren Lastwechsel	16
3.1: Ausgangsstoffe der verwendeten Betonrezepturen	21
3.2: Verwendete Betonrezepturen	21
3.3: Druckfestigkeit f_c getestet an Würfeln 100 x 100 x 100 mm.....	24
3.4: Biegezugfestigkeit f_{ct} getestet an Prismen 40 x 40 x 160 mm	24
3.5: Zugfestigkeitswerte der Probekörper S1 FM und S1 FH	28
3.6: Versuchsparameter der dynamischen Versuche und ertragene Lastwechselzahl bzw. Resttragfähigkeit.....	30
3.7: Rissöffnungsrate in Phase II und die max. und min. Verformungen im Messbereich beim Übergang von Phase II in Phase III (Mittelwerte der Wegaufnehmer-messungen).....	36
4.1: Max. Dehnungen beim Übergang von Phase II in Phase III	44
4.2: Bez. Dauerschwingfestigkeit S_D in Abhängigkeit der Rissbreite für die Versuchskörper der Reihe FH	48

Kapitel 1

1 Einleitung

Ultra High-Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) ist ein Verbundwerkstoff aus Zement, Zusatzstoffen, Zusatzmittel, Gesteinskörnung, Wasser und Fasern. Wegen seiner hohen Packungsdichte erhöht sich die Festigkeit, wie auch die Dauerhaftigkeit von UHPFRC [11, 19]. Im Vergleich zum traditionellen Beton unterscheidet sich UHPFRC durch eine rund 7-mal höhere Druckfestigkeit sowie durch ein duktileres Zugtragverhalten mit Verfestigungs- und Dehnungsentfestigungsbereich (*Strain-Hardening* und *Strain-Softening*). Mit einem E-Modul, welches nur knapp das Doppelte eines normalen Betons beträgt, erreicht UHPFRC aber Zugfestigkeiten bis zu 30 MPa.

UHPFRC kann wegen seiner hohen Festigkeit und seiner verbesserten Dauerhaftigkeit als eine der Innovationen der letzten Jahre im Bauingenieurwesen angesehen werden. Die Anzahl der stetig wachsenden Regelwerke zu UHPC ist ein Beweis dafür [4, 19]. Der zementöse Hochleistungswerkstoff eignet sich aufgrund seiner Eigenschaften auch für die Erhöhung des Tragwiderstandes und der Steifigkeit von hochbelasteten Bauteilen wie z.B. Brücken [11, 12].

1.1 Problemstellung

Infolge der gestiegenen Mobilität in den letzten Jahrzehnten ist die Nutzung von Verkehrsinfrastrukturbauten wie Straßen- und Bahnbrücken stark angestiegen [13]. Aufgrund dieses Verkehrsaufkommens werden die Fahrbahnplatten von Brücken höheren Beanspruchungen ausgesetzt. In vielen Fällen ist in Folge die technische Lebensdauer frühzeitig erreicht, weshalb bereits existierende Brücken ertüchtigt werden müssen. Eine Methode zur nachträglichen Verstärkung von Brücken aus Stahlbeton ist die Aufbringung einer 30-50 mm starken UHPFRC Schicht auf die bereits existierende Fahrbahnplatte [2].

Die Verstärkung von Deckplatten mit UHPFRC unter Nutzung der hervorragenden Materialeigenschaften von UHPFRC führt im Vergleich zum konventionellen Stahlbeton zu geringeren Bauhöhen und Eigengewichten. Es ist davon auszugehen, dass in diesen

Aufbetonschichten aufgrund von z.B. Schwinden oder thermische Gradienten Risse entstehen. Die Fasern in diesen Ultrahochleistungsbetonen weisen rissüberbrückende Eigenschaften auf. Damit ist eine Zugkraftübertragung über den Riss möglich. Um die Sicherheit eines Infrastrukturbauwerkes über die Lebensdauer gewährleisten zu können, ist die Kenntnis der Ermüdungsfestigkeit solcher Bauteile von Bedeutung.

Während in der europäischen Norm EN 1992-1-1 [17] die benötigten Vorschriften für die Bemessung eines ermüdungsgefährdeten Bauteils aus Normalbeton vorhanden sind, fehlen für UHPFRC solche. Jedoch lassen sich Bemessungsansätze für UHPFRC unter Ermüdungsbeanspruchung im *fib* Model Code 2010 [26], der Schweizer Norm SIA 2052 [15] und in dem französischen Regelwerk der AFGCC (Association Française de Génie Civil) – Recommendations on Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrets [16] finden. In Österreich wird derzeit an einer Richtlinie gearbeitet, welche Bemessungskonzepte von UHPFRC unter Ermüdungsbeanspruchung vorsieht. Trotz dieser bereits vorliegenden Bemessungskonzepte besteht insbesondere zu bereits gerissenem UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung eine wesentliche Wissenslücke.

1.2 Zielsetzung und Methodik

Das Ziel dieser Arbeit ist neue Erkenntnisse über das Ermüdungsverhalten von gerissenen (*Pre-Cracked*) UHPFRC Bauteilen unter Zugschwellbeanspruchung zu gewinnen, wobei der Fokus auf dem Einfluss der Rissbreite (*Pre-Cracking*) liegt. Diese Risse repräsentieren die in der Praxis aufgrund von z.B. Schwinden oder thermischen Gradienten entstehenden Risse, die vor Inbetriebnahme eines Bauwerkes auftreten können. Bei den untersuchten Versuchskörpern handelt es sich um zwei unterschiedliche Feinkorn-UHPFRC-Rezepturen, welche im Rahmen eines begleitenden Forschungsprojektes zur UHPC-Richtlinienerstellung von der Österreichischen Bautechnikvereinigung (ÖBV) entwickelt wurden.

Diese Diplomarbeit gliedert sich in fünf Kapitel:

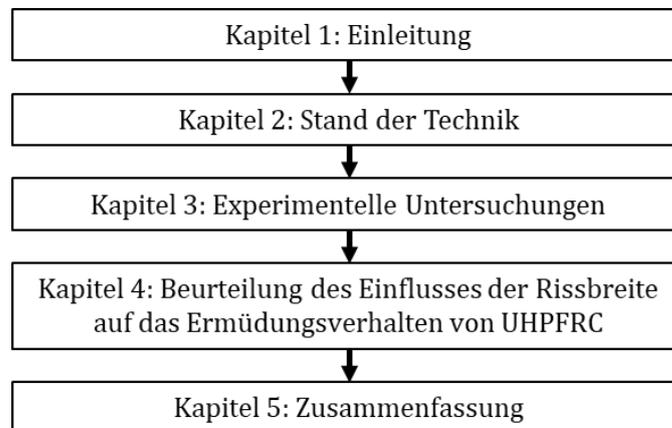


Abb. 1.1: Gliederung der Diplomarbeit

Im ersten Kapitel wird in die Thematik eingeführt und die grundlegende Begriffe werden vorgestellt, die im Zusammenhang mit den Materialeigenschaften und dem

Ermüdungsverhalten von UHPFRC stehen. Im zweiten Kapitel wird durch eine umfangreiche Literaturrecherche der Stand der Technik zum Verbundwerkstoff UHPFRC näher betrachtet. Weiters befasst sich das zweite Kapitel mit Versuchskonzepten, mit welchen der Einfluss der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC untersucht werden kann. Anschließend werden Auswertungsmethoden für das Ermüdungsverhalten von UHPFRC vorgestellt. Im Kapitel drei werden die gewählten Betonrezepturen beschrieben. Im Anschluss wird auf die Versuchskörper und deren Herstellung eingegangen, sowie die verwendete Versuchs- und Messtechnik näher beschrieben. Bei der Durchführung der Versuche war die Einstellung der gewünschten Rissbreite besonders herausfordernd. Die prinzipielle Vorgehensweise wird ebenfalls in Kapitel drei beschrieben. Abschließend werden in diesem Kapitel alle Versuchsergebnisse vorgestellt, beschrieben und interpretiert. Im Kapitel vier wird auf die Beurteilung des Einflusses der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung näher eingegangen. Dazu werden Wöhlerdiagramme, welche in der Arbeit von Heinzlreiter [1] für die jeweiligen Sorten erstellt wurden, herangezogen und die Ergebnisse der Ermüdungsversuche, welche im Rahmen dieser Arbeit erhalten wurden, eingetragen. Durch eine parallele Verschiebung der Regressionsgerade auf die ermittelten Ermüdungswiderstände erfolgt eine Beurteilung des Einflusses der Rissöffnung auf das Ermüdungsverhalten. Zusätzlich werden die Rissöffnungsraten (dw/dn) und die max. Dehnungen im UHPFRC beim Übergang von der Phase II in die Phase III des Schädigungsverlaufes von UHPFRC berechnet, um den Bereich des instabilen und progressiven Risswachstums (Phase III) unter Ermüdungsbeanspruchung mit der statischen Spannungs-Dehnungs-Beziehung vergleichen zu können und den Übergang zu analysieren. Das abschließende Kapitel fünf fasst die wesentlichen Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit zusammen und zeigt weitere offene wissenschaftliche Fragen auf dem Gebiet des Ermüdungsverhaltens von UHPFRC auf.

1.3 Abgrenzung

Da der Einfluss unterschiedlicher Ermüdungsparameter (z.B. Spannungsniveau, Frequenz der Belastung, bezogene Oberspannung etc.), sowie der Materialeigenschaften unter Druck- und Zugschwellbeanspruchung in der Literatur bereits umfangreich beschrieben ist, beziehen sich die Untersuchungen dieser Diplomarbeit besonders auf den Einfluss der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung.

Kapitel 2

2 Stand der Technik

Die Ermüdung von Beton kann als ein Prozess der mechanischen Schädigung verstanden werden der letztendlich zum Versagen des Bauteils führen kann. Die zyklische Belastung ist verantwortlich für die Entstehung und die Entwicklung von Mikrorissen innerhalb der Betonmasse. Die makroskopische Folge dieses Phänomens ist eine Änderung der mechanischen Eigenschaften von Beton [18]. Im Falle von unbewehrten Betonbauteilen würde eine ungebremste Rissentstehung zum abrupten Versagen führen. Die Zugabe von Fasern kann als Rissbremse wirken, wodurch das Ermüdungsverhalten positiv beeinflusst wird.

Dieser Faserbeton (FRC) ist im Bauwesen weit verbreitet, da er eine hervorragende Kombination aus guten mechanischen Eigenschaften und einfacher Handhabbarkeit bietet. FRC wird in vielen üblichen baulichen Situationen zyklischen Belastungen ausgesetzt, die hauptsächlich Zugspannungen verursachen. Darüber hinaus verursachen bestimmte Einwirkungen, wie z.B. Schwinden und thermische Gradienten, Rissbildung. Die Rissbildung vermindert die Steifigkeit und erhöht die Empfindlichkeit der Querschnitte gegenüber Ermüdungsbelastungen. In diesem Fall konzentriert sich der Schaden durch die zyklischen Belastungen besonders auf den gerissenen Bereich [18].

Eine spezielle Form von faserbewehrten Betone stellen Ultrahochleistungsfaserbetone (UHPFRC) dar. Diese Betone grenzen sich deutlich von normal- und hochfesten Betonen durch ihre Zusammensetzung, ihr Größtkorn, Fasergehalt, W/Z-Wert und ihre Eigenschaften ab. In den folgenden Kapiteln wird näher auf die Eigenschaften von UHPC und den Einfluss der Rissbildung vor der Inbetriebnahme eines Bauteiles aus UHPFRC eingegangen.

2.1 UHPFRC

Der Verbundwerkstoff UHPFRC besteht aus einer hochfesten zementösen Matrix, kleinen Zuschlagkörnern und einem hohen Anteil an organischen oder metallischen Fasern. Es werden Druckfestigkeiten von bis zu 200 MPa und Zugfestigkeiten bis zu 30 MPa erreicht.

Durch die Zugabe von Fasern (2-6 Vol.%) kann im Unterschied zum traditionellen Faserbeton, nach Rissbildung in der Matrix ein verfestigendes Verhalten mit einer Mehrfachrissbildung erzielt werden. Somit haben die Fasern im UHPFRC eine Wirkung, die mit der rissverteilenden Minimalbewehrung im Stahlbeton vergleichbar ist. [19]

2.1.1 Betontechnologie

Die UHPFRC-Technologie beruht einerseits auf der Technologie der hochfesten Betone und andererseits auf der der Faserbetone. Durch die Erhöhung der Packungsdichte und die Reduzierung der Gefügestörungen, werden hochfeste Matrizen hergestellt. Damit der Werkstoff ein sehr dichtes Gefüge aufweist, muss das Betongefüge durch die Abstimmung der Partikelgröße von Zuschlag und Bindemittel homogenisiert werden. Durch die steigende Homogenität und dem sinkendem Porenvolumen wird die Festigkeit sowie die Dauerhaftigkeit des Werkstoffes erhöht [19].

Bei einem UHPFRC Mischentwurf werden folgende betontechnologische Gestaltungsansätze verfolgt [19]:

- Reduktion des W/Z bzw. W/B-Wertes auf rund 0,2. Der Betonkörper enthält hierdurch praktisch keine Kapillarporen mehr.
- Einsatz von hoch wirksamen Fließmitteln (Polycarboxylate), um trotz des niedrigen Wassergehaltes eine selbst verdichtende Rheologie zu erzielen.
- Verwendung von reaktiven und inerten Feinst-Füllern. Es werden in der Korngröße genauestens aufeinander abgestimmte Mikrosilika, sowie Quarz- und Kalksteinmehle als Feinstoffe zugegeben.

Die Reduzierung des Porengehaltes und die homogene Verteilung der kleinen Zuschlagstoffe erhöhen die Festigkeit der Matrix, führen aber gleichzeitig zu einer Versprödung des Materials mit einer schlagartigen Rissausbreitung. Deshalb versagen ultrahochfeste Betone abrupt ohne Vorankündigung. Aufgrund der gegenüber der Zuschlagfestigkeit höheren Zementsteinfestigkeit, verläuft die Rissbildung durch die Zuschläge [19].

Um diesem spröden Versagen entgegenzuwirken, wird durch die Zugabe von metallischen oder organischen Fasern mit einer Länge von 2 bis 20 mm und einem Durchmesser von 0.05 bis 2 mm, bei einem Fasergehalt von 2-6 Vol.-%, die Zähigkeit erhöht. Üblicherweise weisen die Fasern eine glatte Oberfläche auf und haben keinen Endhaken. Eine optimierte Wirkung der Fasern kann durch die Zugabe von Fasern mit unterschiedlicher Länge ermöglicht werden. Um eine möglichst gute Verteilung der Fasern im Beton zu erzielen, werden die Fasern während des Mischprozesses zugesetzt. Durch den Optimierungsprozess der Matrix werden mit ultrahochfesten Betonen Druckfestigkeiten von 150-250 MPa erzielt. Unter bestimmten Laborbedingungen und einer Autoklaven-Nachbehandlung wurden Festigkeiten bis 600 MPa erreicht. Die Zugfestigkeit der Matrix liegt bei 5-10 MPa. Durch die zugesetzten Fasern ergibt sich für das Verbundmaterial UHPFRC eine weitere Erhöhung der Zugfestigkeit auf bis zu 30 MPa [19].

Wie in Abb. 2.1 zu erkennen ist, liegt UHPFRC bezüglich seiner Druckfestigkeit eher in der Größenordnung der metallischen Werkstoffe. Bezüglich seiner Steifigkeit mit 35-50 GPa liegt UHPFRC nur geringfügig höher im Vergleich zum traditionellen Beton. [19]

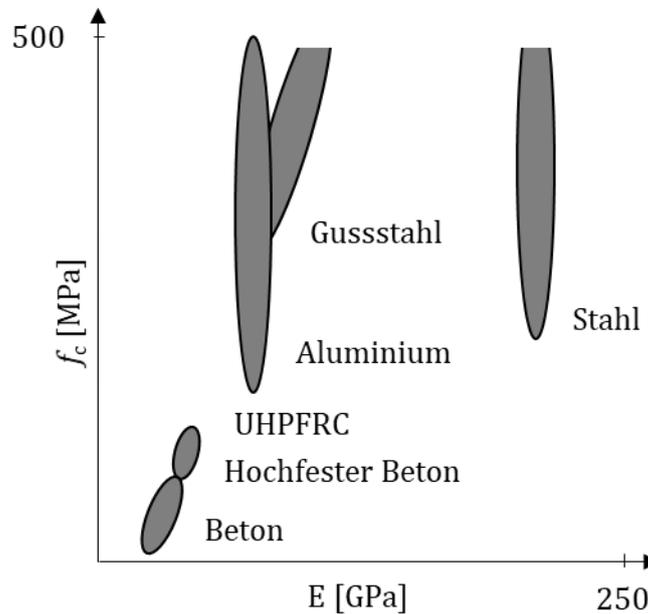


Abb. 2.1: Vergleich von UHPFRC bezüglich seiner Festigkeit und Steifigkeit mit anderen Werkstoffen [19]

Der hohe Zementanteil und der niedrige Wasser-Bindemittelwert haben ein starkes autogenes Schwinden des UHPFRC zur Folge. Bezüglich des Kriechverhaltens ergeben sich trotz des niedrigen Wassergehalts bei UHPFRC relevante Kriechverformungen [19].

2.1.2 Zugverhalten von UHPFRC

Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung von UHPFRC unter quasi-statischer einaxialer Zugbeanspruchung ist durch drei verschiedene Bereiche charakterisiert [2] (siehe Abb. 2.2):

- Elastischer Bereich

Im elastischen Bereich hängt das Verformungsverhalten eines Zugelements aus UHPFRC überwiegend von den Eigenschaften der Betonmatrix ab. Aufgrund der noch nicht entstandenen Risse sind die Fasern nicht aktiviert und haben somit praktisch keinen Einfluss [19]. Die ersten Mikrorisse entstehen erst bei Erreichen der Erstrissfestigkeit f_e [2].

- *Strain-Hardening-Bereich*

Nach Überschreitung der Erstrissfestigkeit f_e werden die Fasern aktiviert [2]. Die Fasern überbrücken den Mikroriss und wirken als Rissbremse. Die Faserauszugfestigkeit der rissüberbrückenden Fasern ist bei ausreichend großem Fasergehalt höher als die Zugfestigkeit der Matrix. Hierdurch kommt es nach der

initialen Rissbildung zu einem verfestigenden Verhalten [19] bei gleichzeitiger Reduktion der Steifigkeit [2]. Dieses verfestigte Verhalten wird *Strain-Hardening* genannt. Bei weiterer Beanspruchung wird an anderen Stellen der Probekörper ebenfalls die Zugfestigkeit der Matrix überschritten, und somit entstehen weitere Mikrorisse [19]. Im weiteren Verlauf tritt *Strain-Hardening* auf, bis die Zugfestigkeit f_u im schwächsten Querschnitt des Probekörpers erreicht wird [2].

- *Strain-Softening-Bereich*

Zufolge steigender Beanspruchung bildet sich in der schwächsten Querschnittsstelle ein Makroriss. Die Verformungen werden in dem Bereich des Makrorisses lokalisiert, wobei es außerhalb dieses Bereiches zu einer Entlastung kommt. Schließlich endet der *Strain-Softening-Bereich* mit einem Bruch des Probekörpers [2].

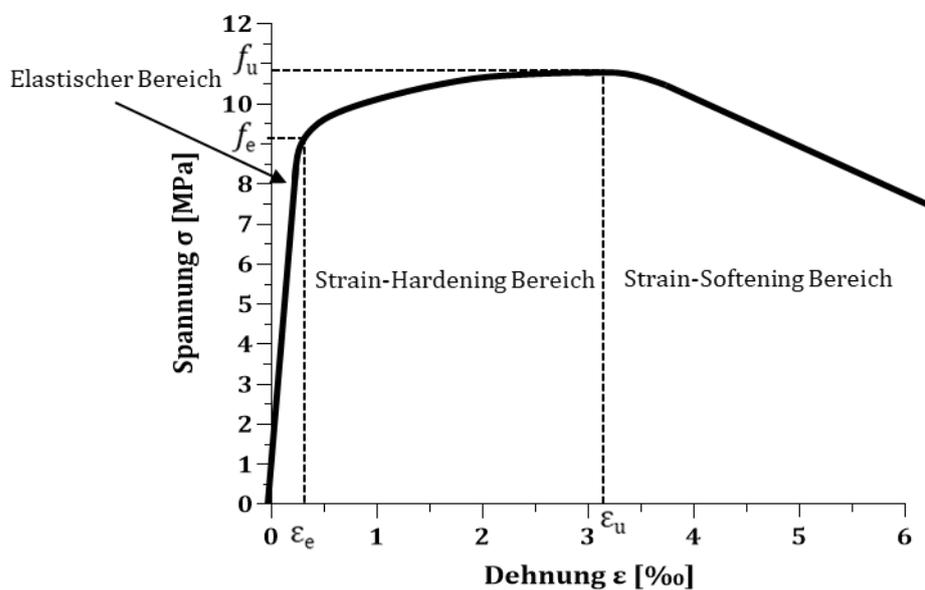


Abb. 2.2: Schematische Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung von UHPFRC-Probekörper unter quasi-statischer Zugbeanspruchung [2]

2.1.3 Ermüdung von UHPFRC

Um das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung zu beurteilen, wurden bisher nur sehr wenige experimentelle Untersuchungen durchgeführt. In der Literatur ist die Datengrundlage dort wo der Fokus der Forschung auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Druckschwellbeanspruchung gelegt wurde vielfältiger. In den bisherigen Versuchen mit Zugschwellbeanspruchung wurde u.a. der Einfluss unterschiedlicher Ermüdungsparameter (wie z.B. Spannungsniveau, Frequenz der Belastung etc.), Geometrie der Versuchskörper, sowie die Materialeigenschaften (Betonfestigkeit, Fasergehalt, Art von Fasern etc.) auf das Ermüdungsverhalten untersucht. Es ist jedoch festzuhalten, dass die meisten dieser dynamischen Untersuchungen an ungerissenen Versuchskörpern unter Biegebeanspruchung durchgeführt wurden.

Risse gehören zu den häufigsten Mängeln in Ingenieurbauwerken. Diese können bereits kurz nach der Errichtung eines Bauwerkes aufgrund von z.B. Schwinden oder thermischen Gradienten, und der eigentlichen Belastung vorhanden sein. Angesichts der zyklischen Natur der eintretenden Einwirkungen v. a. in Ingenieurbauwerken wie z.B. Brücken, ist das Ermüdungsverhalten von gerissenen UHPFRC-Bauteilen von Interesse [24].

Es ist allgemein bekannt, dass die Betonzerstörung unter Ermüdungsbeanspruchung hauptsächlich in der Bruchprozesszone (Fracture Process Zone (FPZ)) an der Risspitze auftritt. Daher kann das Ermüdungsverhalten von Beton unter dynamischer Beanspruchung nur dann richtig untersucht werden, wenn das Materialverhalten in der Bruchprozesszone bekannt ist. Dies kann durch einaxiale dynamische Zugversuche an gerissenen (*Pre-Cracked*) Versuchskörpern ermittelt werden [25]. Die vorliegende Diplomarbeit adressiert bestehende Wissenslücken indem neue Erkenntnisse über den Einfluss der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung geschaffen werden.

2.1.3.1 Allgemein

Ermüdung ist definiert als ein Prozess, bei dem fortschreitende, dauerhafte innere Strukturveränderungen eines Materials durch dynamische Belastung verursacht werden. Im Beton sind diese Veränderungen mit der fortschreitenden Entwicklung innerer Mikrorisse verbunden, welche auf der Makroebene zum Verlust der mechanischen Eigenschaften führen [6, 20]. Die in der Betonmatrix vorhandenen Mikrorisse, z.B. aus Schwinden, wachsen in weiterer Folge mit zunehmender zyklischer Beanspruchung an, vereinigen sich und führen durch die Aufweitung zu Makro- und Matrixrissen letztlich zur Bildung von Bruchflächen, die den Versagenszustand kennzeichnen [21].

Der Ermüdungswiderstand von Stahlfaserbeton wird durch unterschiedliche Parameter beeinflusst, wobei die Versuchsergebnisse von [22, 23] aufzeigten, dass die signifikantesten Einflussparameter identisch mit dem Normalbeton sind. In der Literatur sind folgende Einflussfaktoren angeführt [8]:

- 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 Probekörper
- Eigenspannungen im Bauteil oder in den Probekörpern
- Belastungsfrequenz
- Einflüsse der Temperatur
- Schwinden und Kriechen
- Luftporengehalt
- Fasergehalt und Faserorientierung

Die Ermüdungsbeanspruchung wird in zwei Kategorien unterteilt [24]:

- „Low-Cycle“ Ermüdung
- „High-Cycle“ Ermüdung

„Low-Cycle“ Ermüdung ist durch eine geringe Anzahl der ertragenen Lastwechsel ($N < 10^3$ bis 10^4) und hohen Spannungsniveaus, ähnlich wie die durch die Erdbeben induzierten Lastwechsel, charakterisiert. „High-Cycle“ Ermüdung ist durch eine höhere Anzahl der Lastwechsel und ein geringes Spannungsniveau, aus z.B. durch rotierende Maschinen verursachte Beanspruchungen, charakterisiert. [24]

Um die Ergebnisse von Ermüdungsversuchen darzustellen und den Ermüdungswiderstand zu bestimmen, werden unterschiedliche Methoden vorgeschlagen. Am häufigsten finden Wöhlerdiagramme ($S-N$ Diagramme) Anwendung [2, 6]. Die Beschreibung des Ermüdungsvorganges selbst erfolgt anhand von „Cycle Creep Curves“. Dies ist eine verformungsbasierte Methode, welche in der Regel die Zunahme der Verformungen über die Lastwechsel als Funktion der ertragbaren Lastzyklen darstellt. [3, 6, 23]

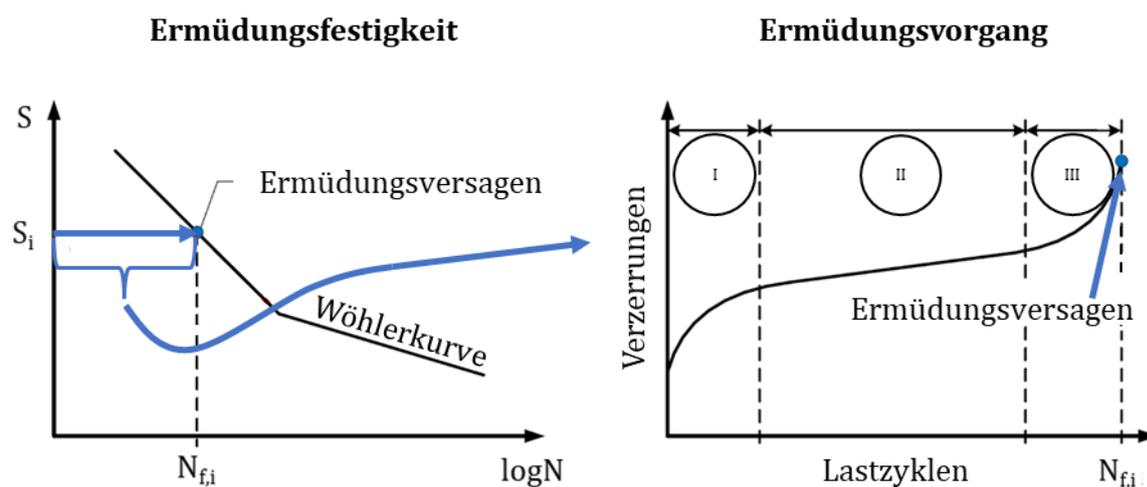


Abb. 2.3: Schematische Darstellung der Ermüdungsfestigkeit von Beton anhand der Wöhlerlinie (links) sowie Veranschaulichung des zugrunde liegenden und während der Lebensdauer ablaufenden Ermüdungsvorganges (rechts) [22]

Weiters liefern die Bruchflächen sehr wichtige Informationen über das Materialversagen unter Ermüdungsbeanspruchung [2]. Die Methode zur Beschreibung und Beurteilung von Bruchfläche heißt Fraktographie [10].

2.1.3.2 Wöhlerkurven und deren Bestimmung

Wöhlerkurven repräsentieren eine weithin akzeptierte Methode in der Ingenieurpraxis, um den Ermüdungswiderstand von Bauteilen zu ermitteln. Diese Methode basiert auf empirisch abgeleiteten $S-N$ Diagrammen die auch Wöhlerkurven genannt werden. Anhand der empirischen Kurven ist es möglich, das Ermüdungsverhalten von Werkstoffen für bestimmte Beanspruchungsparameter graphisch darzustellen [20]. Für

zementartige Werkstoffe wird die dimensionslose Größe S als Spannungsindikator verwendet. S ist das Verhältnis zwischen der max. aufgetragenen Spannung und der Zugfestigkeit. Diese Kenngröße findet Anwendung, um Streuungen in der Werkstoffzusammensetzung, Versuchskörpergröße und dem Versuchsaufbau zu minimieren. Weiters wird für die Anzahl der ertragenen Lastwechsel N eine halb-logarithmische Skala verwendet. [2]

In Anlehnung an die Kategorisierung der Ermüdungsbeanspruchung („Low-Cycle“ Ermüdung und „High-Cycle“ Ermüdung) kann in Wöhlerdiagrammen eine Unterscheidung zwischen Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeit erfolgen, wobei der von Wöhler geprägte Begriff der Dauerfestigkeit, auch Dauerschwingfestigkeit genannt, die Höhe der konstanten Ermüdungsbeanspruchung bezeichnet, die theoretisch unendlich oft aufgebracht werden kann, ohne ein Materialversagen zu verursachen [21]. Bei metallischen Werkstoffen ist die Grenze der Dauerschwingfestigkeit genau definiert und liegt für Spann- und Betonstahl bei zwei Millionen Lastzyklen. Bei Beton ist diese Grenzlastspielzahl nicht definiert. Man spricht daher von einer Quasi-Dauerschwingfestigkeit [9].

In der Literatur gibt es unterschiedliche Vorschläge, um die Dauerschwingfestigkeit von Beton und Faserbeton zu ermitteln. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird näher auf das Versuchskonzept von Makita und Brühwiler [2], Plizzari et al. [25] sowie von Carlesso et al. [4] eingegangen, da es sich hier speziell um UHPFRC handelt und der Einfluss der Rissbreite mitberücksichtigt wurde.

2.1.3.2.1 Versuchskonzept Makita und Brühwiler [2]

Die experimentellen Untersuchungen von Makita und Brühwiler repräsentieren ein Konzept, in dem die Dauerschwingfestigkeit von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung anhand einaxialer dynamischer Zugversuche mit einer max. Lastwechselzahl N von 10 Millionen ermittelt wird. Bei Fahrbahnplatten von Brücken gelten 10 Million Lastzyklen als realistisches Szenario für stark befahrene Brücken. Die experimentellen Untersuchungen inkludieren quasi-statische und dynamische Zugversuche mit einer konstanten Amplitude.

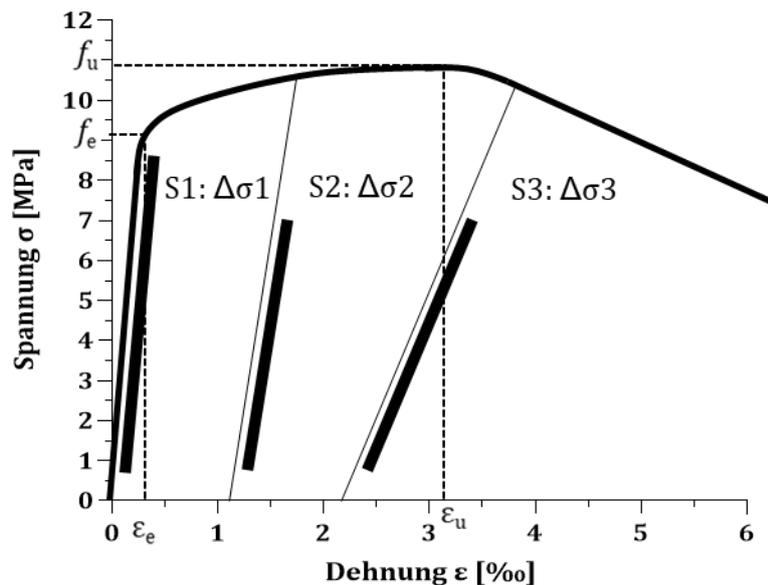


Abb. 2.4: Schematische Darstellung des quasi-statischen Verhaltens von UHPFRC-Versuchskörpern unter Zugbeanspruchung und Definition der dynamischen Zugversuche [2]

Die quasi-statischen Zugversuche dienen dazu, die Materialkennwerte von UHPFRC zu ermitteln (Erstrissfestigkeit und Nachrissfestigkeit) und das allgemeine Verhalten von UHPFRC unter Zugbeanspruchung zu beschreiben. Aus der Spannungs-Dehnungs-Linie von UHPFRC kann die elastische Grenze (Erstrissfestigkeit) nicht immer eindeutig erkannt werden. Eine Methode für die Bestimmung der elastischen Grenze (Erstrissfestigkeit) von UHPFRC wurde deshalb entwickelt (siehe [2]).

Anhand dynamischer Versuche wird die Dauerschwingfestigkeit von UHPFRC, mit einer bezogenen Oberspannung die innerhalb der elastischen Grenze liegt, ermittelt. Weiters wird der Einfluss der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung untersucht, in dem die Untersuchungen auch an vorgerissenen (*Pre-Cracked*) Versuchskörpern durchgeführt werden. Dazu wird bei erstmaliger Beanspruchung der Probekörper bis in den Bereich des *Strain-Hardenings* bzw. *Strain-Softening* gedehnt (siehe Abb. 2.4).

In Anlehnung an dieses Versuchskonzept wurden von Makita et al. drei Serien von Ermüdungsversuchen an UHPFRC-Versuchskörpern durchgeführt. Dabei wurde die bezogene Oberspannung und Rissbreite (*Pre-Cracking*) nach folgendem Schema variiert.

- S1 Serie: max. Spannung in der Höhe des elastischen Bereiches
- S2 Serie: *Pre-Cracking* bis in den *Strain-Hardening* Bereich gefolgt von dynamischen Versuchen
- S3 Serie: *Pre-Cracking* bis in den *Strain-Softening* Bereich gefolgt von dynamischen Versuchen

Die von Makita und Brühwiler verwendete Mischrezeptur ist durch 3 Vol.% gerader Stahlfasern mit einer Länge von 13 mm, sowie einem Durchmesser von 0.16 mm und Zement des Typs CEM III/B charakterisiert.

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich bezüglich des Ermüdungsverhaltens von UHPFRC unter einaxialer Zugbeanspruchung mit konstanter Amplitude festhalten:

- Es konnte für UHPFRC-Bauteile eine Dauerschwingfestigkeit bei 10 Millionen Lastzyklen ermittelt werden. Auftretende Ermüdungsbeanspruchungen oberhalb dieser Festigkeit induzieren Schaden, der zur kürzeren Lebensdauer solcher Bauteile führt.
- Die Dauerschwingfestigkeit der S1 Serie (max. Spannung bei Vorbelastung in der Höhe des elastischen Bereiches) betrug $S = 0.7$, der S2 Serie (*Pre-Cracking* in der Größe des *Strain-Hardening* Bereiches) betrug $S = 0.6$, und der S3 Serie (*Pre-Cracking* in der Größe des *Strain-Softening* Bereiches) betrug $S = 0.45$. Das *Pre-Cracking* hat demnach einen großen Einfluss auf den Ermüdungswiderstand von UHPFRC.

2.1.3.2.2 Versuchskonzept Plizzari et al. [25]

Um ein besseres Verständnis über das Ermüdungsverhalten von Beton zu erhalten, wurde von Plizzari et al. ein Versuchskonzept entwickelt. Plizzari et al. gehen davon aus, dass die Betonerstörung unter Ermüdungsbeanspruchung hauptsächlich in der Bruchprozesszone (Fracture Process Zone (FPZ)) in der Risspitze auftritt. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen [27] haben gezeigt, dass hohe Vorbelastungen (*Pre-Peaks*) in der Belastungsgeschichte von Versuchskörpern dazu beitragen, dass sich die Rissöffnungsrate während der zyklischen Beanspruchungen erhöht. Die Erhöhung der Rissöffnungsrate ist auf das Vorhandensein einer größeren Bruchprozesszone (FPZ) nach dem Aufbringen dieser hohen Vorbelastungen (*Pre-Peaks*) zurückzuführen.

Zudem ist in der Literatur bekannt, dass die max. Rissöffnung in einem Versuchskörper unter zyklischer Beanspruchung vor dem eigentlichen Versagen dann auftritt, wenn die dynamische Last-Verschiebungs-Kurve die dazugehörige Spannungs-Dehnungsverlaufskurve (Envelope-Kurve) berührt, welche aus quasi-statischen monotonen Biegezugversuchen approximiert werden kann [28]. Eine frühzeitige hohe Belastung würde die dynamische Last-Verschiebungskurve näher an den abfallenden Ast der Envelope-Kurve rücken (siehe Abb. 2.5).

In den Arbeiten von Plizzari et al. wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Das Versuchsprogramm besteht dabei prinzipiell aus zwei Teilen:

- Im ersten Teil werden die Brucheigenschaften unter quasi-statischen einaxialen Zug- und Biegeversuchen ermittelt, wobei die Verformungsrate konstant gehalten wird.
- Im zweiten Teil wird das Ermüdungsverhalten von Beton unter einaxialen dynamischen Zugversuchen untersucht.

Der Ablauf der dynamischen Versuche ist in vier Belastungsstufen eingeteilt:

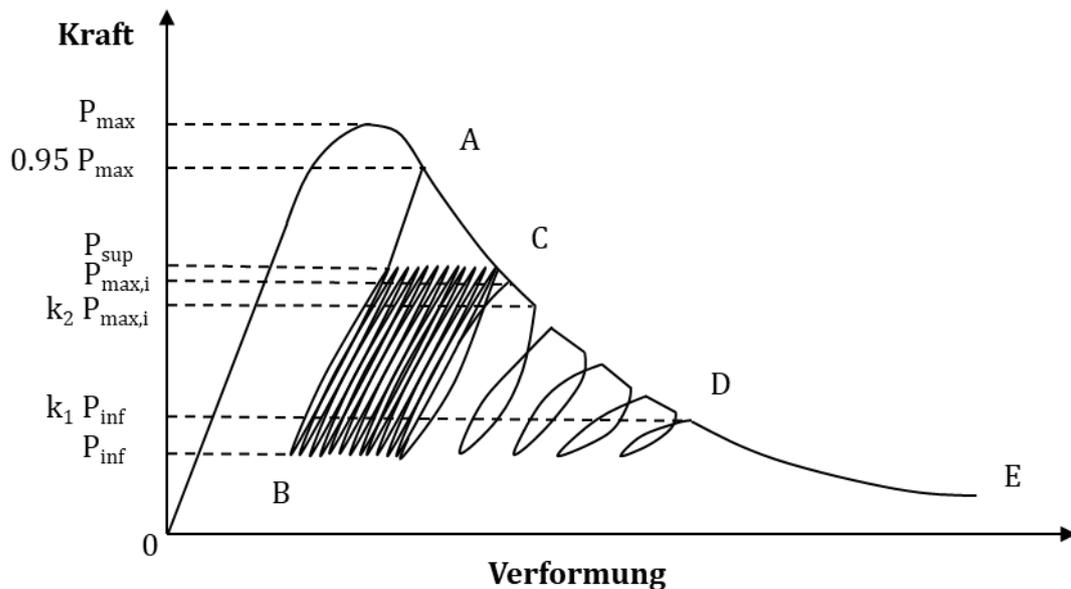


Abb. 2.5: Belastungsgeschichte für die Ermüdungsversuche nach Plizzari et al. [25]

- In der ersten Stufe (**OAB**) wird der Versuchskörper statisch vorbelastet bis P_{\max} (*Peak-Load*), wobei die Verformungsrate konstant gehalten wird. Eine Entlastung bis zur gewählten Unterlast für die dynamischen Versuche P_{inf} (**Punkt B**) ist erst dann vorgesehen, wenn im Kraft-Weg Diagramm die Kraft z.B. 95% von P_{\max} beträgt (**Punkt A**) (*Pre-Cracking*).
- In der zweiten Stufe (**BC**) wird der Versuchskörper zyklisch beansprucht mit einer Frequenz von ca. 1 Hz. Die Oberlast für die dynamischen Versuche wird als P_{sup} bezeichnet. P_{inf} und P_{sup} werden als Prozentsätze von P_{\max} gewählt (z.B. 25% und 75% von P_{\max}).
- In der dritten Stufe (**CD**), wenn die dynamische Last-Verschiebung Kurve die dazugehörige Envelope-Kurve (**ACDE**) erreicht, wird die Oberlast $P_{\max,i}$ auf 95% von P_{sup} reduziert. Diese Belastungsstufe wird abgeschlossen, wenn die Oberlast $k_2 \cdot P_{\max,i}$ (k_2 ist der Reduzierungskoeffizient für $P_{\max,i}$), welche die Envelope-Kurve berührt, kleiner als $k_1 \cdot P_{\text{inf}}$ wird. Das Limit $k_1 (>1)$ wird vor der Versuchsdurchführung eingestellt.
- In der vierten Stufe (**DE**) wird eine monotone Vergrößerung der Rissbreite induziert, bis die dafür aufgebrauchte Kraft 1% von P_{\max} beträgt. An diesem Punkt wird der Test abgebrochen.

Plizzari et al. verglichen im Rahmen ihrer Untersuchungen das Ermüdungsverhalten zylindrischer Versuchskörper aus unbewehrtem und faserverstärktem Normalbeton bzw. hochfestem Beton. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von Beton untersucht, in dem unterschiedliche Prozentsätze (85%, 90 %, 95% und 98%) von P_{\max} für den **Punkt A** (siehe Abb. 2.5) in der Belastungsgeschichte gewählt wurden.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden unter anderem folgende wichtige Erkenntnisse über die Ermüdung von Beton gewonnen:

- Die Rissbreite beeinflusst stark den Ermüdungswiderstand von Beton. Je höher der Prozentsatz von P_{\max} für den **Punkt A** im Diagramm (*Pre-Cracking*) gewählt wird, desto höher ist die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel N .
- Die Annahme, dass die Zerstörung von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung innerhalb der Bruchprozesszone (Fracture Prozess Zone (FPZ)) an der Rissspitze und nicht an unbeschädigten Zonen auftritt, wurde durch diese Untersuchungen unterstützt.

2.1.3.2.3 Versuchskonzept Carlesso et al. [4]

Das Konzept von Carlesso et al. sieht eine strukturdesign-orientierte Analyse des Ermüdungsverhaltens von vorgerissenen (*Pre-Cracked*) UHPFRC-Versuchskörpern mit einer Rissbreite (*Pre-Cracking*) von 0.5 mm (entspricht dem Grundzustand der Gebrauchstauglichkeit gemäß *fib* Model Code 2010 [26]) anhand dynamischer 3-Punkt-Biegeversuche vor. Das Versuchskonzept ist in statische Kontrollversuche und dynamische Versuche gegliedert. Im Rahmen der Kontrollversuche werden die Druckfestigkeit (gemäß EN 12390-3:2009), der Elastizitätsmodul (gemäß EN 12390-4:2009) und die Biegezugfestigkeit (gemäß EN 14651:2007) von UHPFRC ermittelt. Die dynamischen Versuche werden nach folgender schematischen Anweisung durchgeführt:

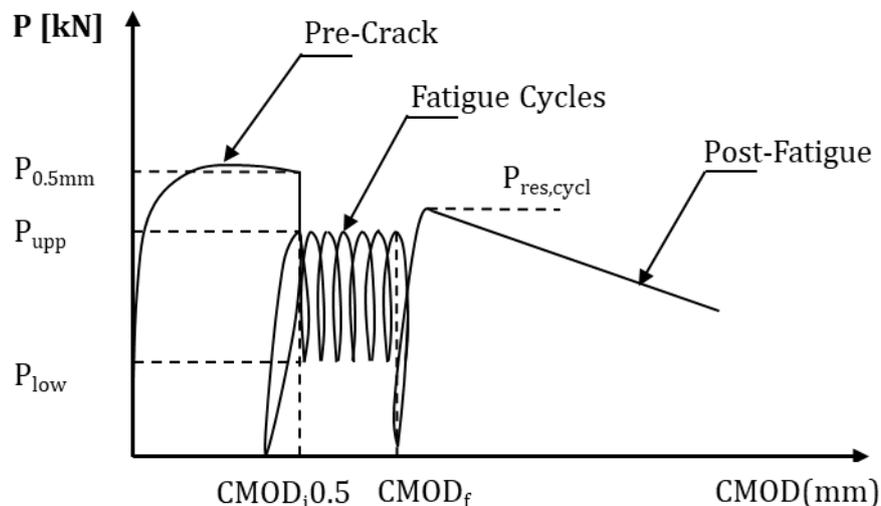


Abb. 2.6: Belastungsgeschichte für die Ermüdungsversuche nach Carlesso et al. [4]

- In der ersten Stufe wird der Versuchskörper statisch vorbelastet (Verformungsrate 0.5 mm/m) bis die Rissbreite (*Pre-Cracking*) 0.5 mm beträgt. Für jeden Versuchskörper wird die Belastung $P_{0.5mm}$, welche eine Rissbreite von 0.5 mm ($f_{R,1}$ -Wert gemäß *fib* Model Code 2010 [26]) während der statischen Vorbelastung induziert, aufgezeichnet und als max. Belastung eingestellt.
- In der zweiten Stufe wird der Versuchskörper dynamisch beansprucht (kraftgesteuert). Die Oberlasten werden als Prozentsätze der $P_{0.5mm}$ -Werte gewählt, während die Unterlasten als Funktionen der Belastungsamplitude gewählt werden ($R=P_{low}/P_{upp}=0.3$).

- In der dritten Stufe werden die Versuchskörper, welche eine max. Lastwechselzahl von $N = 2 \times 10^6$ ohne zu versagen erreichten, statisch wiederbelastet, um die Resttragfähigkeit $P_{res,cycl}$ zu bestimmen.

Die von Carlesso et al. verwendete Mischrezeptur ist durch 2 Vol.% gerader Stahlfasern mit einer Länge von 13 mm, sowie einem Durchmesser von 0.16 mm und Zement des Typs CEM I-52R charakterisiert. Die Dauerschwingfestigkeit von UHPFRC wurde auch hier anhand der *S-N* Diagramme (Wöhlerdiagramme) bestimmt.

Anhand dieser strukturdesign-orientierten Analyse wurden unter anderem folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Die Ermüdungsfestigkeit von vorgerissenen (*Pre-Cracked*) UHPFRC-Versuchskörpern ist das Ergebnis einer probabilistischen Faserorientierung und Verteilung sowie einer Streuung im Ermüdungsverhalten selbst.
- Eine Dauerschwingfestigkeit in Bezug auf 2 Millionen Lastwechsel von vorgerissenen (*Pre-Cracked*) UHPFRC Versuchskörpern existiert und ist unter den gewählten Randbedingungen 66% von $P_{0.5mm}$.

2.1.3.3 Cycle Creep Curves

Um den Schädigungsverlauf von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung zu analysieren, werden in der Literatur „Cycle Creep Curves“ verwendet. Dabei handelt es sich um eine verformungsbasierte Methode, welche die Zunahme der Verformungen über die Lastwechsel als Funktion der ertragbaren Lastzyklen darstellt. [3, 6, 23]

Diese Kurven können in drei Phasen eingeteilt werden [4]:

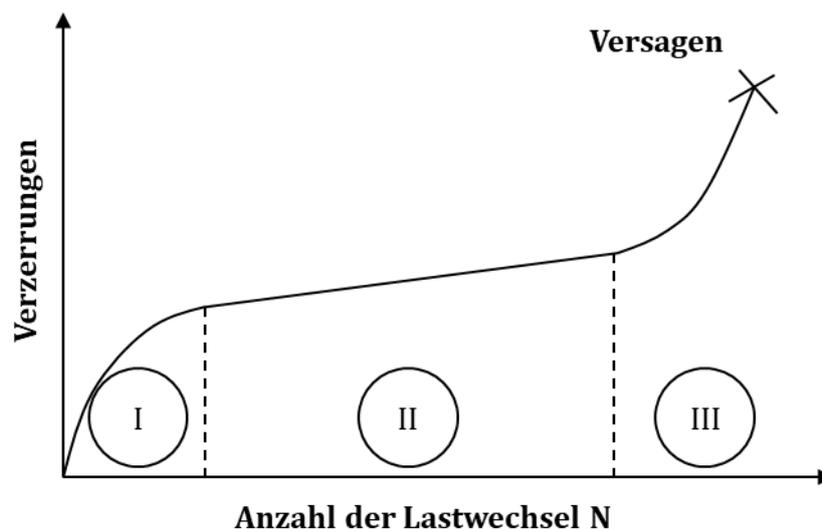


Abb. 2.7: Schematische Darstellung einer Cycle Creep Curve [6]

- Phase I entspricht der Phase der Rissentstehung [8] und ist durch eine große Zunahme der Verformung aufgrund bereits existierender Mikrorisse charakterisiert [4].

- Phase II bezeichnet den stabilen Rissfortschritt [8]. In dieser Phase nimmt die Verformung gleichmäßig zu [3].
- Phase III repräsentiert das schnelle, instabile Risswachstum [8] bis zum Versagen [4].

Auf der makroskopischen Ebene weist der Schädigungsverlauf von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung keinen Unterschied bezüglich des Belastungstyps (Zugschwell-, Druckschwell- oder Wechselbeanspruchung) auf. Jedoch sind wesentliche Unterschiede im Schädigungsfortschritt und damit in der Anzahl der ertragbaren Lastwechsel zu beobachten [8].

In der Literatur [6, 8, 29, 31, 32] wird der Übergang von Phase I zu Phase II bei 5% bis 20% und von Phase II zu Phase III bei 80% bis 95 % der ertragbaren Lastwechsel angegeben. Tab. 2.1 repräsentiert die Phasenübergänge für normal-, hochfesten- und ultrahochfesten Beton, welche im Rahmen der Dissertationen von Rings [32], Oneschkow [31] und Fitik [8] bestimmt wurden.

Tab. 2.1: Übergangsphasen im Schädigungsverlauf von Normalbeton (NSC), hochfestem Beton (HSC) und ultrahochfestem Beton (UHPC) in Prozent der ertragbaren Lastwechsel

Betonart	$n/N^{I/II}$	$n/N^{II/III}$
Normalbeton (NSC) [32]	20%	80%
Hochfester Beton (HSC) [31]	11%	93%
Ultrahochfester Beton (UHPC) [8]	5%	95%

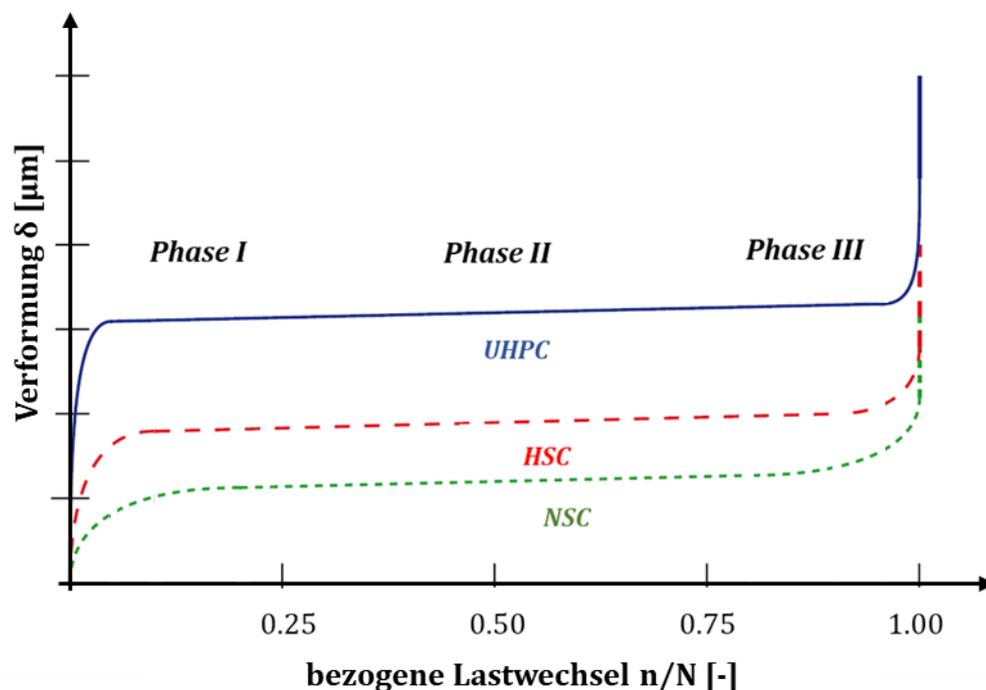


Abb. 2.8: Qualitative Darstellung des Schädigungsverlaufes von normal-, hochfestem- und ultrahochfestem Beton [8].

Eine qualitative Darstellung der Schädigungsverläufe von Normalbeton (NSC), hochfestem Beton (HSC) und ultrahochfestem Beton (UHPC) ist in Abb. 2.8 dargestellt. Dabei sind die Verformungen δ als Funktionen der bezogenen Lastwechselzahl (das

Verhältnis zwischen den tatsächlichen Lastzyklen n zu den max. ertragbaren Lastzyklen bis zum Bruch N) eingetragen.

Fitik [8] empfiehlt im Rahmen seiner Dissertation folgende Gleichung, um die Schädigungsverläufe im Beton mathematisch zu bestimmen.:

$$\varepsilon = a^m * (n/N + b)^m + c * (n/N) + e \quad [\text{‰}] \quad (1)$$

Dabei bezeichnet ε Dehnungen im Beton und n/N die bezogenen Lastwechsel. Der Beiwert b ist 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 Schädigungsverlaufes.
- Der Beiwert e verschiebt den Schädigungsverlauf durch den Ursprung.

Wie in Abb. 2.8 zu erkennen ist, sind bei Normalbeton (NSC) die erste und die dritte Phase etwas länger und ausgeprägter als bei hochfestem Beton (HSC) und ultrahochfestem Beton (UHPC). Zudem weisen hochfeste- und ultrahochfeste Betone höhere Verformungen als Normalbeton auf [8].

Die Zugabe von Fasern in Beton schließt den Faserbeton von dem dreiphasigen Schädigungsverlauf nicht aus [21]. Jedoch wurde in [20, 23] von einem dualen Effekt der Fasern auf die Ermüdungsfestigkeit berichtet. Einerseits kann die Zugabe von Fasern rissinitiierend wirken und die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel gegenüber dem unbewehrten Beton reduziert sich. Dieser Effekt ist auf eine mögliche ungenügende Verdichtungsarbeit oder die mangelnde Anpassung des Fasertyps an die Betonzusammensetzung zurückzuführen, welche zu einer vermehrten Anzahl von Poren und Fehlstellen in der Matrix beiträgt. Andererseits kann sich die Zugabe von Fasern auch günstig auf die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel auswirken. Die Fasern wirken rissüberbrückend und bei zyklischer Beanspruchung bremsen sie den Rissfortschritt [21].

2.1.3.4 Fraktographie

Die Bruchflächen können sehr wichtige Informationen über die Ursache des Materialversagens liefern [2]. Die Beschreibung und Beurteilung von Bruchflächen heißt Fraktographie [10]. Am meisten Anwendung findet die Fraktographie in der Analyse des Versagens metallischer Werkstoffe. Da UHPFRC Merkmale des mechanischen Verhaltens von Metallen aufweist, können die Bruchflächen von ermüdungsbeanspruchtem UHPFRC mittels Fraktographie analysiert werden [2].

In der Literatur [2] sind für Bruchflächen von unter einaxialer Zugschwellbeanspruchung belasteten UHPFRC Versuchskörpern drei spezifische Versagensmerkmale notiert:

- *Snubbing*

Als *Snubbing* wird in der Literatur [2, 33] der Mechanismus bezeichnet, bei dem die Fasern zum Teil oder vollständig aus der Matrix herausgezogen werden und die Ausziehrichtung nicht der Faserrichtung entspricht (siehe Abb. 2.9).

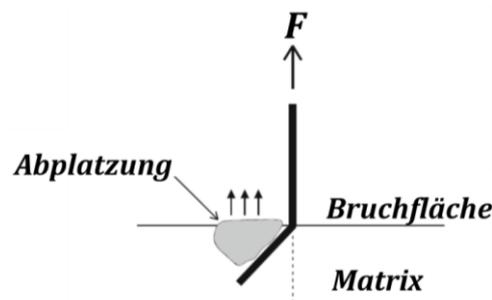


Abb. 2.9: Snubbing [2]

Zufolge *Snubbing* entstehen Abplatzungen von kleinen Matrixstücken. Im Rahmen der weiteren dynamischen Belastung reiben sich die abgeplatzten Matrixstücke gegenseitig ab, wodurch auf der Bruchfläche von UHPFRC-Versuchskörpern pulverisierte Matrix zu erkennen ist. Ein weiteres Merkmal, welches *Snubbing* charakterisiert, sind die gebogenen Fasern auf der Bruchfläche [2].

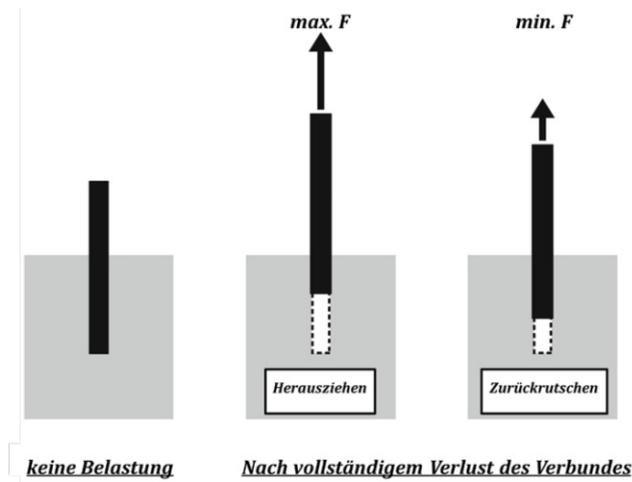
- Glatte Bruchfläche

Glatte Bereiche der Bruchfläche weisen auf den Ort der Rissinitiation hin [2]. Die glatte Oberfläche ist meistens durch weniger Faseranteile im Vergleich zur restlichen Fläche charakterisiert. Beim Herstellungsprozess von UHPFRC-Versuchskörpern kann es zu einer ungleichmäßigen Verteilung von Fasern im Materialvolumen kommen. Infolgedessen gibt es lokale Zonen im Versuchskörper mit geringeren Faseranteilen. In diesen lokalen Zonen können nur wenige Zugspannungen übertragen werden, was zu einer früheren Rissbildung führt [2].

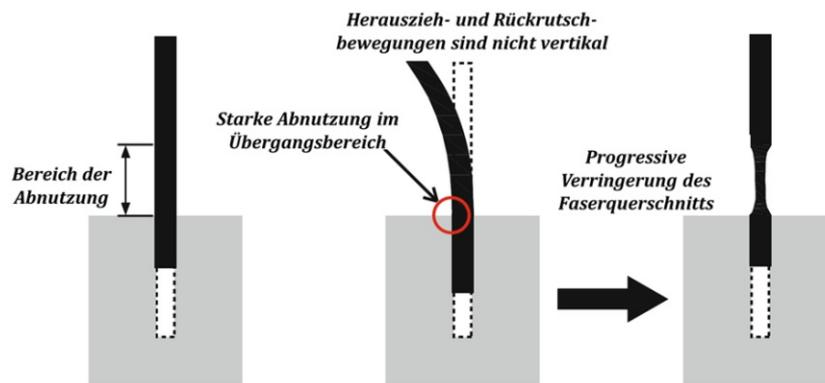
- Rostspuren

Rostspuren sind ein weiteres Merkmal, welche auf der Bruchfläche von belasteten UHPFRC-Versuchskörpern unter Zugschwellbeanspruchung beobachtet werden kann. Der Rost ist auf den Mechanismus der Tribokorrosion zurückzuführen. Die Tribokorrosion kann verantwortlich für den Bruch der Fasern sein. Die Zugspannungen werden in Mikro- und Makrorisszonen durch Fasern überbrückt. Während der zyklischen Beanspruchung werden die Fasern aus der Matrix herausgezogen und rutschen zum Teil wieder in die Auszugsrichtung hinein. Dabei löst sich der Verbund zwischen Fasern und Matrix, und gleichzeitig werden die Oberflächen der Fasern und der Matrix abgenutzt, wenn die Herauszieh- und Rückrutschrichtung nicht vertikal ist. Durch die Abnutzung kommt es zu einer progressiven Verringerung des Faserquerschnittes, die schließlich zu einem Bruch

der Fasern, anstelle eines Herausziehens, führt. Die Abnutzungen der Faserquerschnitte sind als Rostspuren auf der Bruchfläche sichtbar. [2]



(a)



(b)

Abb. 2.10: Mechanismus der Tribokorrosion: (a) Herausziehen und Zurückrutschen der Fasern durch dynamische Beanspruchung (b) Ablösung des Haftverbundes zwischen Fasern und Matrix sowie die Abnutzung der Fasern [2]

Kapitel 3

3 Experimentelle Untersuchungen

Im Zuge des Forschungsprojektes „UHPC Austria“ wird in dieser Diplomarbeit der Einfluss der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung untersucht. Das durchgeführte Versuchsprogramm ist an das Versuchskonzept von Heinzlreiter [1] angelehnt. Nach eingehender Literaturrecherche wurde das Versuchskonzept an die Versuchsserien von [2, 3, 25] angepasst. Es handelt sich bei den zwei untersuchten UHPFRC-Sorten um UHPFRC-Feinkorn-Rezepturen, die einen unterschiedlichen Fasergehalt, eine unterschiedliche Zugtragfähigkeit und ein unterschiedliches Nachbruchverhalten aufweisen.

Da die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Ermüdungsparameter (z.B. Spannungsniveau, Frequenz der Belastung, bezogene Oberspannung etc.), sowie der Materialeigenschaften unter Druck- und Zugschwellbeanspruchung bereits umfangreich behandelt wurde [6], beziehen sich die Untersuchungen dieser Diplomarbeit besonders auf den Einfluss der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung.

3.1 Betonrezepturen

Die beiden untersuchten Feinkorn-UHPFRC-Rezepturen (siehe Tab. 3.2) sind durch 1.5 Vol.-% (Rezeptur FM) und 2.5 Vol.-% (Rezeptur FH) gerader Stahl Mikrofasern mit einer Länge von $12.5 \text{ mm} \pm 1.5 \text{ mm}$, sowie einem Durchmesser von $0.175 \text{ mm} \pm 0.015 \text{ mm}$ charakterisiert. Die Mikrofasern besitzen einen E-Modul von $210\,000 \text{ N/mm}^2$ und eine Zugfestigkeit von 2800 N/mm^2 [5].

Die unterschiedlichen Fasergehalte ergaben sich, um planmäßig einerseits ein *Strain-Hardening* Verhalten (FH-Rezeptur) und andererseits ein reines *Strain-Softening* Verhalten (FM-Rezeptur) zu erhalten. Die FH-Rezeptur erforderte dadurch einen höheren Fließmittelgehalt, da durch den erhöhten Fasergehalt die Frischbetonkonsistenz steifer wird und somit der Frischbeton für die Verarbeitung nicht mehr genügend fließfähig wäre. Die Ausgangsstoffe der verwendeten Betonrezepturen sind in der Tab. 3.1

aufgelistet. Die restlichen Bestandteile des Betons sind in etwa in gleich großen Volumenanteilen vorhanden (siehe Tab. 3.2).

Tab. 3.1: Ausgangsstoffe der verwendeten Betonrezepturen [1]

Bezeichnung	Hersteller	Kornbereich	Rohdichte
		[μm]	[g/m^3]
Lafrage Contragress – CEM I 52.5 N ¹	Lafrage (Mannersdorf)	0.2-125	3.17
Mikrosilika – 920 E D	Elkem		2.20
Quarzmehl – Dorsilit 16900	Dorfner	0.3-100	2.63
Quarzsand – GEBA	Dorfner	60-250	2.65
Quarzsand – Dorsilit Nr. 8	Dorfner	300-800	2.65
Fließmittel – BT3 Premment H500 ²	BT3		1.07
Stahlfasern – DM 12.5/0.175 ³	KrampeHarex		

¹ SR 0 WT 38 C3A-frei; Blaine-Wert 4500 [cm^2/g]

² Feststoffgehalt 30%

³ Durchmesser 0.175/0.2 mm

Tab. 3.2: Verwendete Betonrezepturen [1]

	Menge [kg/m^3]	
	Rezeptur FM	Rezeptur FH
Lafrage Contragress – CEM I 52.5 N	750	750
BASF Mikrosilika	90 (12% v. ZG)	90 (12% v. ZG)
Quarzmehl – Dorsilit 16900	300 (40% v. ZG)	300 (40% v. ZG)
Quarzsand Geba 0.1-0.2 mm	193.67	188.1
Quarzsand – Dorsilit Nr. 8	775.33	752.5
Wasser	186.7	184.7
Wasser (inkl. Anteil in Fließmittel)	202.5 (W/Z = 0.27)	202.5 (W/Z = 0.27)
Fließmittel – BT3 Premment H500	22.5 (3% v. ZG)	25.5 (3.4% v. ZG)
Stahlfasern – DM 12.5/0.175	117.7 (1.5 Vol.-%)	196.3 (2.5 Vol.-%)

3.2 Geometrie der Probekörper

Zur Untersuchung des Einflusses der Rissbreite auf das UHPFRC Ermüdungsverhalten unter Zugschwellbeanspruchung wurde die Geometrie der Probekörper an jene Geometrie angelehnt, welche im Rahmen einer weiteren Diplomarbeit [1] am Institut konzipiert wurde. Es handelt sich um ungekerbte Probekörper mit einer Länge von 500 mm, einer Dicke von 50 mm und einer Breite von 150 mm an den Lasteinleitungsbereichen. Um einen Riss möglichst in der Mitte zu bekommen, wurde der Probekörper ausgehend vom Lasteinleitungsbereich bis zur Mitte mit einem Voutenradius von 600 mm auf eine Breite von 100 mm verjüngt. Die Probekörpergeometrie ist in Abb. 3.1 dargestellt.

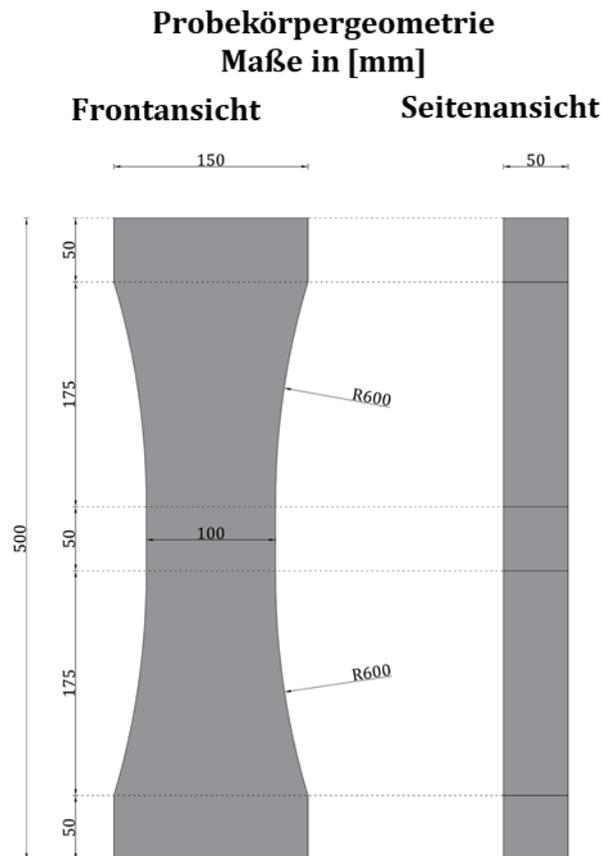


Abb. 3.1: Geometrie der UHPFRC-Versuchskörper [1]

Für die Herstellung der Probekörper wurden Einzelschalungen aus Kunststoffplatten in Kombination mit Holz verwendet (siehe Abb. 3.3 (b)). Die Schalungswände der Vouten bestanden aus 2 mm dicken Hartschaumplatten. Im Bereich seitlich der Lasteinleitung gab es zwei Öffnungen. Die gegenüberstehenden Öffnungen dienten der Einbringung des Betons und der Entweichung der Luft, die während des Gießvorgangs des Frischbetons, an die Oberfläche dringt. Um eine günstigere Orientierung der Fasern im ausgehärteten Zustand zu erhalten, wurde der Beton immer nur von einer Seite eingebracht. Durch die Fließrichtung ergab sich eine entsprechende Orientierung der Fasern.

3.3 Herstellung der Probekörper

Die Herstellung der Mischungen sowie die Betonage der Probekörper erfolgte im Prüflabor des Forschungsbereichs Baustofflehre und Werkstofftechnologie der Technischen Universität Wien nach den gleichen Arbeitsschritten wie in der Diplomarbeit von Heinzlreiter [1] beschrieben. Dabei wurde für die verwendeten UHPFRC-Rezepturen folgende Mischanweisung verfolgt:

1. Zugabe des Zements, des Mikrosilikas und des Quarzmehls-Trockenmischen (ca. 3 min)

2. Zugabe des Wassers und des Fließmittels–Mischen bis zur Dispergierung aller Feinstoffe (je nach Mischintensität des Mixers kann dies von 30 sek bis zu mehreren Minuten dauern)–hohe Mischintensität erforderlich
3. Zugabe des Quarzsands–3 min mischen
4. Vereinzelt Zugabe der Stahlfasern–2 min mischen

Die gesamte Mischdauer betrug ca. 8-10 Minuten. Nach dem Mischen wurde die Konsistenz der UHPFRC-Mischung mit dem Hägermann-Konus bestimmt. Wie in Abb. 3.2 dargestellt, betrug das Setzfließmaß für die FM Rezeptur 260 mm und für die FH Rezeptur 270 mm. Diese befand sich innerhalb der angestrebten Zielkonsistenz von 250-280 mm. Eine Anpassung des Fließmittelgehaltes war bei der jeweiligen Betonage nicht mehr erforderlich.

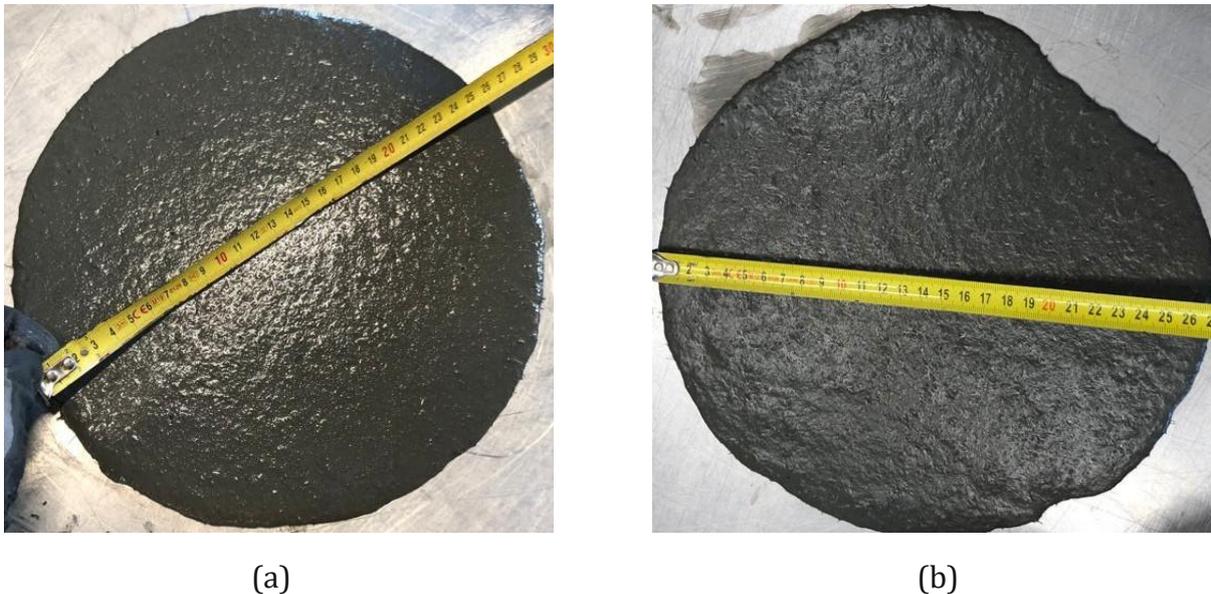


Abb. 3.2: Setzfließmaß: (a) FM Rezeptur (b) FH Rezeptur

Der Frischbeton wurde direkt nach dem Mischen mit Hilfe eines Kübels langsam in die vorher geölten Schalungskörper gegossen und anschließend mit Folien abgedeckt, um eine schnelle Austrocknung des Betons zu verhindern. Die Ausschalung der Versuchskörper erfolgte 24 Stunden nach der Betonage, gefolgt von einer Lagerung in einer Klimakammer für mindestens vier Wochen bei einer Raumtemperatur von 20°C und einer Luftfeuchtigkeit von 60 %. Damit erreichte jeder Prüfkörper seine 28-Tage-Festigkeit. Insgesamt wurden mit dieser Vorgehensweise eine Charge je Sorte zu je sechs Probekörpern hergestellt.

Die Materialkennwerte der hergestellten UHPFRC-Rezepturen wurden durch statische Druck- und Biegezugversuche bestimmt. Die Druckversuche wurden an Betonwürfel mit einer Seitenlänge von 100 mm durchgeführt. Die 3-Punkt-Biegeversuche wurden an Prismen mit den Abmessungen von 40 x 40 x 160 mm und einer Stützweite von 100 mm durchgeführt. Die Druckfestigkeit bzw. Biegezugfestigkeit der einzelnen Würfeln bzw. Balken, sowie der Mittelwert der durchgeführten Versuche ist für beide UHPFRC-Rezepturen in den Tab. 3.3 und Tab. 3.4 herauszulesen. Die verwendete Kunststoffschalung für die Herstellung der Würfel, sowie die Stahlschalungen für die Herstellung der Prismen sind in der Abb. 3.3 (a) dargestellt.

Tab. 3.3: Druckfestigkeit f_c getestet an Würfeln 100 x 100 x 100 mm

Probekörperbezeichnung	Betonrezeptur	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]
Würfel 1 FM	Rezeptur FM	179.17	174.56
Würfel 2 FM	Rezeptur FM	176.77	
Würfel 3 FM	Rezeptur FM	167.73	
Würfel 1 FH	Rezeptur FH	168.30	172.24
Würfel 2 FH	Rezeptur FH	172.28	
Würfel 3 FH	Rezeptur FH	176.15	

Tab. 3.4: Biegezugfestigkeit f_{ct} getestet an Prismen 40 x 40 x 160 mm

Probekörperbezeichnung	Betonrezeptur	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]
BZ 1 FM	Rezeptur FM	31.59	30.42
BZ 2 FM	Rezeptur FM	28.30	
BZ 3 FM	Rezeptur FM	31.38	
BZ 1 FH	Rezeptur FH	39.62	39.78
BZ 2 FH	Rezeptur FH	40.31	
BZ 3 FH	Rezeptur FH	39.43	



(a)



(b)

Abb. 3.3: Betontage: (a) Würfel und Prismen zur Festigkeitsbestimmung (b) Probekörper

3.4 Versuchsaufbau und Messeinrichtungen

Beim Versuchsaufbau wurde, wie in der der Diplomarbeit von Heinzlreiter [1] beschrieben (siehe Abb. 3.4), darauf geachtet, dass die Versuchskörper nur durch Zug-Normalkräfte beansprucht wurden.

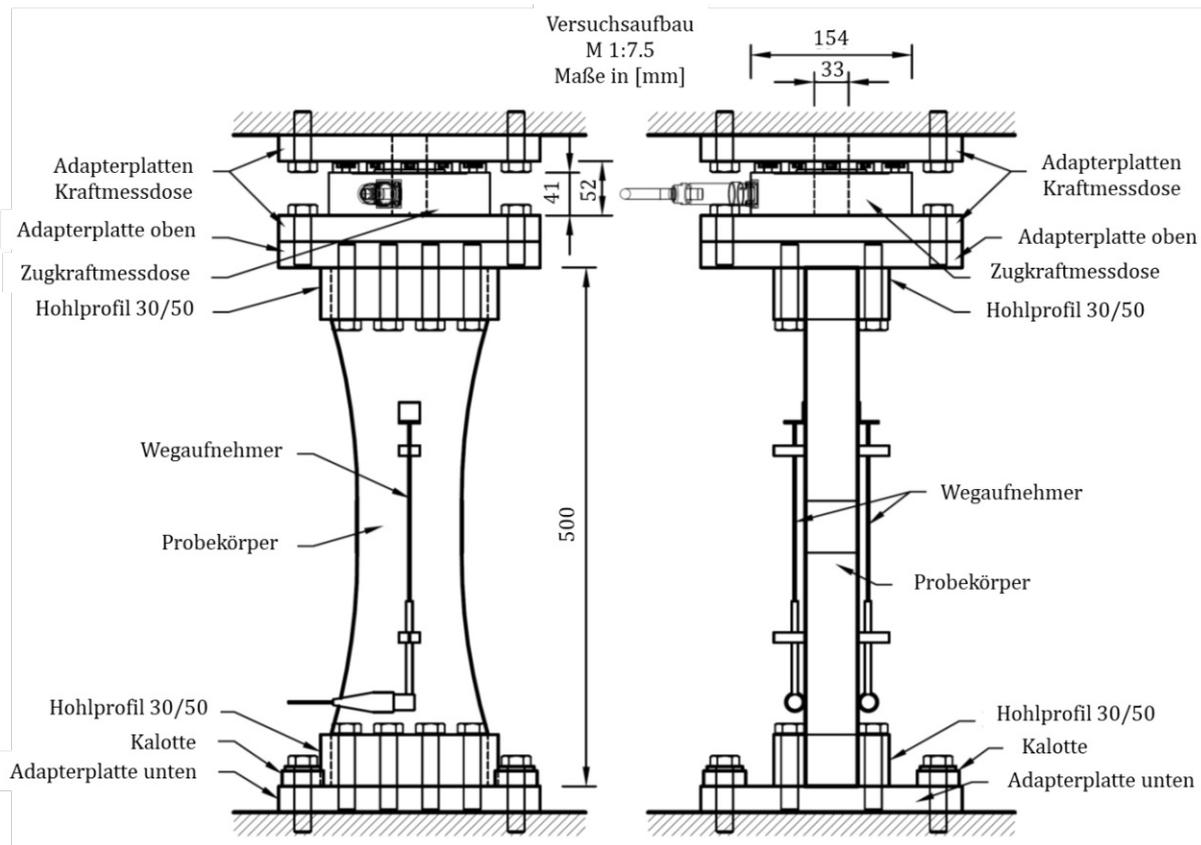


Abb. 3.4: Versuchsaufbau für die Ermüdungsversuche [1]

Die Probekörper wurden dazu an den Seitenflächen zwischen zwei Hohlprofile sowie stirnflächenseitig an einer Stahlplatte mit einem Zwei-Komponenten-Klebstoff auf Epoxidharzbasis (MC-DUR 1280) eingeklebt. Um einen besseren Haftverbund zu ermöglichen, wurden die Probekörper an den Klebestellen sandgestrahlt und die Hohlprofile sowie die Stahlplatte mit Aceton gereinigt. Als Sandstrahlgut wurde Quarzsand mit einer Korngröße von 0.3-0.8 mm verwendet (Quarzsand Dorsilit Nr. 8 0.3-0.8 mm). Um Biegespannungen zu vermeiden, wurden die Probekörper zuerst in umgedrehter Richtung zentrisch an die obere Adapterplatte geklebt. Dabei wurde darauf geachtet, dass keine Abweichung zum Lot entsteht. Nach einer Aushärtezeit von 24 Stunden wurde der Probekörper umgedreht und die Unterseite geklebt. Damit eine ausreichend hohe Festigkeit des Klebstoffes gewährleistet werden konnte, wurde der Epoxidharzkleber auch hier für mindestens weitere 24 Stunden ausgehärtet, bevor die Versuche durchgeführt wurden.

Die Durchführung der Versuche erfolgte im Prüflabor des Forschungsbereiches Stahlbeton- und Massivbau der Technischen Universität Wien mit einer hydraulischen Prüfmaschine. Aufgrund der geringen dynamischen Prüfbelastungen bei den Versuchen im Vergleich zur Kapazität der Prüfmaschine (dynamische Prüflast max. ± 1.6 MN), wurde eine Kraftmessdose vom Typ U10M mit einer Nennkraft von 125 kN der Firma HBM zusätzlich im Versuchsaufbau integriert, damit eine genauere Ansteuerung der Versuchsbelastung möglich wurde.

Wie in Abb. 3.5 dargestellt ist, erfolgte die Verbindung der Probekörper mit der Prüfmaschine durch Adapterplatten. An der Oberseite wurde die Adapterplatte der

Prüfkörper mit der Adapterplatte der integrierten Kraftmessdose kraftschlüssig verschraubt, während an der Unterseite die Adapterplatte der Prüfkörper an der Bodenplatte durch vier Gewindestangen befestigt wurde. Um Exzentrizitäten auszugleichen, wurden an der Unterseite Kalotten zwischengefügt und bei Bedarf an der Oberseite dünne Bleche eingelegt.



Abb. 3.5: Eingebauter Probekörper

Die Aufzeichnung der Verformungen im Mittelbereich der Probekörper erfolgte während der statischen und dynamischen Versuche durch drei induktive Wegaufnehmer. Die Messlänge der Wegaufnehmer betrug 20 cm. Weiters wurde der Maschinenweg der Prüfmaschine aufgezeichnet.

3.5 Statische Versuche

Um das Verhalten der beiden UHPFRC-Sorten unter einaxialer statischer Zugbeanspruchung zu ermitteln, wurde für beide Versuchsreihen FM und FH jeweils ein statischer Zugversuch durchgeführt. Die Geometrie der Probekörper für die statischen Versuche ist dieselbe wie für die Ermüdungsversuche. Dabei wurde der Probekörper mit einer konstanten Geschwindigkeitsrate von 1 mm/min belastet. Die Spannungs-Dehnungs-Linien der statischen Zugversuche sind in Abb. 3.6 dargestellt. S1 bezeichnet die Nummer und FH bzw. FM die Rezeptur der Probekörper.

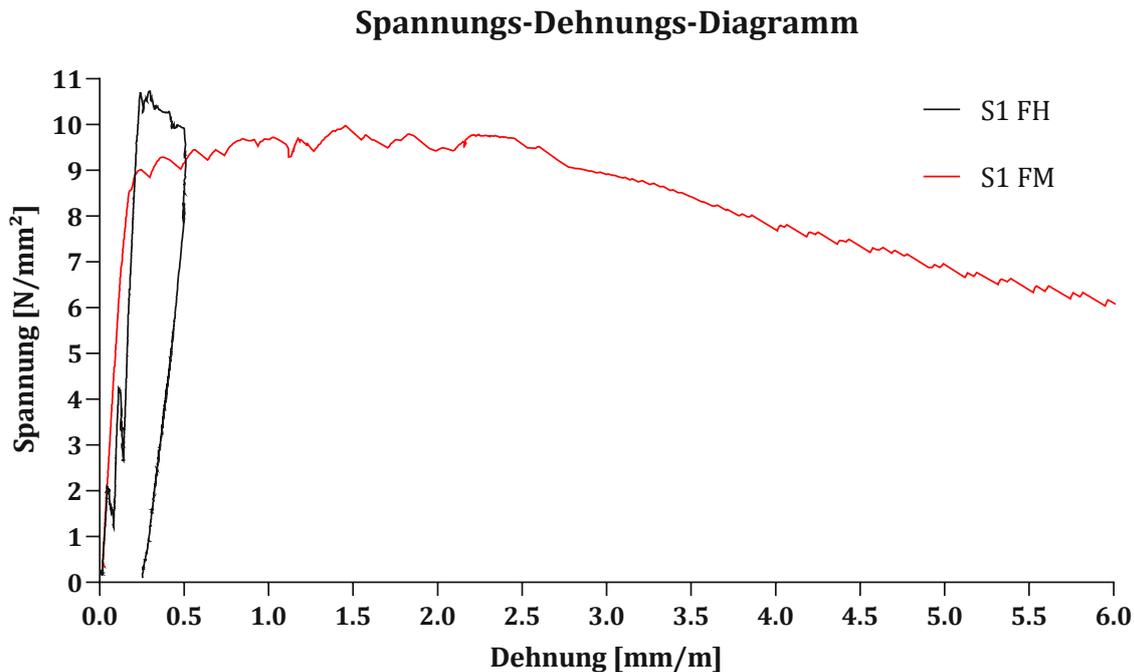


Abb. 3.6: Spannung – Dehnungs-Diagramm der statischen Zugversuche

Wie in der Abb. 3.6 für beide Rezepturen zu erkennen ist, weist UHPFRC unter einaxialer Zugbeanspruchung zwei Stadien auf:

- Linear elastisches Verhalten vor der Rissbildung
- Verhalten nach der Rissbildung einschließlich des Beitrags der Stahlfasern

Mit der Entstehung des ersten Risses wurden die Fasern aktiviert. Aus der Spannungs-Dehnungs-Linie des Probekörpers S1 FM ist das typische Nachbruchverhalten von UHPFRC unter einaxialer Zugbeanspruchung zu erkennen. Dabei kann das *Strain-Hardening* Verhalten, gefolgt von dem *Strain-Softening* Verhalten identifiziert werden. Die Festigkeitserhöhung (*Strain-Hardening*) ist auf den Beitrag der Fasern und der Adhäsionskräfte zwischen Faser und Matrix zurückzuführen [4]. Die Absenkung der Festigkeit nach Erreichen eines Maximums ergibt sich aus dem Ausziehen und dem Abreißen der Fasern im Querschnitt (*Strain-Softening*)[4].

Beim Probekörper S1 FH wurde hingegen eine untypische Spannungs-Dehnungs-Linie aufgezeichnet. Dieser Kurvenverlauf ist auf eine Rissentstehung außerhalb des Messbereichs der Wegaufnehmer zurückzuführen. Dadurch konnte die Dehnungszunahme im Riss nicht aufgezeichnet werden. Die im Diagramm ersichtlichen Lastabfälle zu Belastungsbeginn sind auf ein Nachjustieren des Probekörpers, um Exzentrizitäten auszugleichen, zurückzuführen und stellen keine Rissbildung dar.

Obwohl der Riss bei dem Probekörper S1 FH in der Nähe des Lasteinleitungsbereichs (siehe Anhang B.7 Versuch S1 FH) entstand, beziehen sich die Spannungen für beide Probekörper S1 FH und S1 FM auf die schwächste Querschnittsfläche in der Mitte (100 x 50 mm) des Probekörpers. Die Dehnungen wurden aus dem Mittelwert der drei durch die Wegaufnehmer aufgezeichneten Weglängen berechnet, dividiert durch die Basislänge von $l_0 = 200$ mm.

Tab. 3.5: Zugfestigkeitswerte der Probekörper S1 FM und S1 FH

Probekörperbezeichnung	Erstrissfestigkeit [N/mm ²]	Nachrissfestigkeit [N/mm ²]
S1 FM	9.01	9.98
S1 FH	10.74	nicht gemessen

Tab. 3.5 stellt die Festigkeitswerte der Probekörper S1 FM und S1 FH dar. Die Nachrissfestigkeit für den Probekörper S1 FH konnte nicht gemessen werden, da der Riss außerhalb des Messbereiches entstand. Ersichtlich ist auch, dass der Probekörper S1 FH eine höhere Erstrissfestigkeit (10.74 N/mm²) im Vergleich zum Probekörper S1 FM (9.01 N/mm²) aufweist. Dies ist auf den Fasergehalt zurückzuführen.

3.6 Dynamische Versuche

3.6.1 Allgemein

Das Ziel der dynamischen Versuche war es, den Einfluss der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung zu bestimmen. Zusätzlich wurde für jede UHPFRC-Rezeptur (FM und FH) ein Langzeitversuch ($LW = 1 \times 10^7$) unter einer definierten Rissbreite von 0.2 mm durchgeführt. Die Ergebnisse aus den Langzeitversuchen werden anhand der ermittelten Wöhlerdiagramme der Diplomarbeit von Heinzlreiter [1] beurteilt und entsprechend eingeordnet.

Insgesamt wurden fünf Ermüdungsversuche je Rezeptur durchgeführt. Die durchgeführten dynamischen Versuche wurden mit den Nummern D1 bis D4 und der zugehörigen Rezeptur FM bzw. FH des Versuchskörpers bezeichnet. Die Langzeitversuche wurden mit LA sowie der entsprechenden Rezeptur FM bzw. FH bezeichnet.

Um die Risswachstumsentwicklung in den UHPFRC Versuchskörpern unter zyklischer Belastung zu überwachen, wurden die Ermüdungsversuche in drei Belastungsstufen durchgeführt. Die Lastwechselzahl, der minimale und maximale Weg der auf der Außenseite der Probekörper angeklebten Wegaufnehmer, und der minimale und maximale Maschinenweg wurden während des gesamten Versuches aufgenommen.

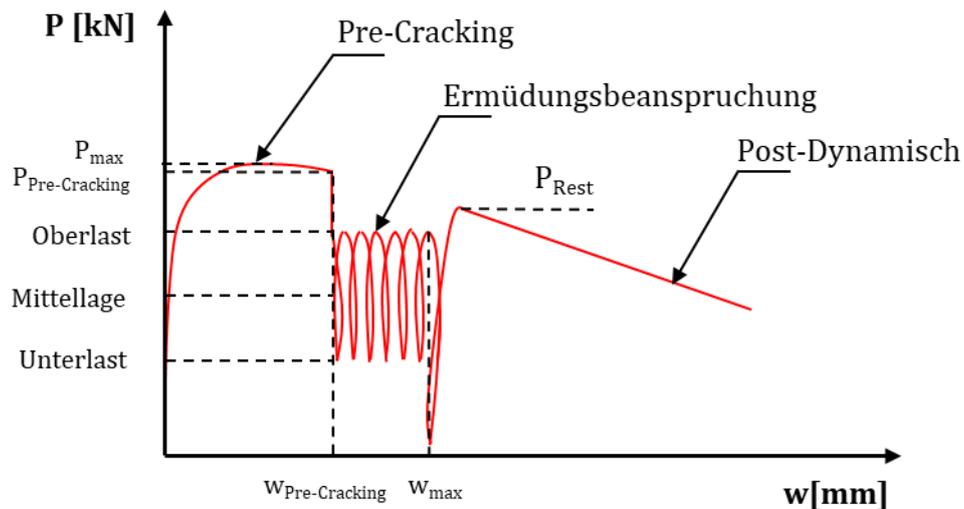


Abb. 3.7: Belastungsgeschichte in den Ermüdungsversuchen [4]

In der ersten Stufe wurde jeder Versuchskörper statisch vorbelastet, bis der erste Riss optisch und akustisch sowie im aufgezeichneten Kraft-Weg-Diagramm festgestellt wurde. Eine Entlastung erfolgte erst dann, wenn im Kraft-Weg Diagramm die Zielverformung (*Pre-Cracking*) erreicht wurde. Die Verformungsrate betrug 0.5 mm/min. Die erste statische Vorbelastung bildete eine Risszone, die grundlegend ist, um das Ermüdungsverhalten im Beton besser beurteilen zu können [4]. Das *Pre-Cracking* ersetzt dabei Risse, die z.B. durch Schwindspannungen vor der Inbetriebnahme, im Beton entstehen können. In dieser Diplomarbeit wurden Versuchskörper mit einer Rissbreite von 0.2, 0.3, 0.4, und 0.6 mm untersucht.

In der zweiten Stufe wurden die Versuchskörper dynamisch belastet (kraftgesteuert). Die dynamische Belastung folgte einer Sinuswelle mit einer Frequenz von 10 Hz. Die Oberlast wurde durch einen Prozentsatz des Mittelwerts der Zugtragfähigkeit des statischen Versuchs S1 dieser Diplomarbeit und der durchgeführten statischen Versuche von Heinzlreiter [1] für jede UHPFRC-Rezeptur gewählt. Diese Oberlast orientierte sich an der Wöhlerlinie die in Heinzlreiter [1] für diese beide Sorten bestimmt wurde. Die Unterlast betrug bei jedem dynamischen Versuch 5 kN. Ausgehend von der geplanten Ober- und Unterlast, mit der der Versuchskörper beansprucht wurde, wurde die Mittellage berechnet. Die Mittellage bezeichnet die Last, auf die der Probekörper nach dem *Pre-Cracking* entlastet wurde und von der aus die Versuchskörper dynamisch beansprucht wurden.

In der dritten Stufe wurden die Versuchskörper statisch belastet, um die Resttragfähigkeit zu bestimmen. Die Verformungsrate betrug 1mm/m. Dabei wurden nur die Versuchskörper untersucht, welche eine maximale Lastwechselzahl von $N = 2 \times 10^6$ bzw. $N = 1 \times 10^7$ (für die Langzeitversuche) ohne zu versagen erreichten. Diese Versuchskörper werden in weiterer Folge als Durchläufer (DL) bezeichnet.

3.6.2 Messergebnisse

Tab. 3.6 fasst die Ergebnisse der Ermüdungsversuche an den vorgerissenen (*Pre-Cracked*) UHPFRC Versuchskörpern unter einaxialer Zugbeanspruchung zusammen.

Tab. 3.6: Versuchsparameter der dynamischen Versuche und ertragene Lastwechselzahl bzw. Resttragfähigkeit

Bezeichnung	¹ P _{max} [kN]	² PC [mm]	³ S [-]	⁴ OL [kN]	⁵ UL [kN]	⁶ N	⁷ P _{Rest} [kN]
D1 FM 55.26 PC 0.4	45.10	0.4	0.55	27.2	5	2036652	-
D2 FM 58.71 PC 0.4	57.82	0.4	0.58	28.9	5	598901	-
D3 FM 55.26 PC 1.2	48.67	1.2	0.55	27.2	5	2151	-
D4 FM 58.71 PC 0.2	48.63	0.2	0.58	28.9	5	549851	-
D1 FH 67.47 PC 0.6	52.61	0.6	0.67	36.8	5	2251	-
D2 FH 67.47 PC 0.2	54.49	0.2	0.67	36.8	5	56001	-
D3 FH 67.47 PC 0.3	49.95	0.3	0.67	36.8	5	3101	-
D4 FH 56.52 PC 0.4	51.70	0.4	0.56	30.83	5	366801	-
LA FM 43.68 PC 0.2	44.77	0.2	0.43	21.5	5	9997451	46.08
LA FH 56.52 PC 0.2	52.57	0.2	0.56	30.83	5	2158051	-

¹Zugtragfähigkeit; ²Pre-Cracking; ³bez. Oberspannung; ⁴Oberlast; ⁵Unterlast; ⁶Ertragene Lastwechsel; ⁷Resttragfähigkeit

Die Bezeichnung der dynamischen Versuche besteht aus der Nummerierung D1 bis D4, Rezeptur FH bzw. FM, bezogene Oberlast S in [%] und Rissbreite PC (*Pre-Cracking*, z.B. 0.4 mm). Die Langzeitversuche wurden mit LA bezeichnet.

Bei den Versuchskörpern D1 FM und D2 FM betrug in beiden Fällen die Rissbreite (*Pre-Cracking*) 0.4 mm und die bezogene Oberspannung S war bei dem Versuchskörper D2 FM ca. 5.9% höher als bei dem Versuchskörper D1 FM. Die Anzahl der ertragenen Lastwechsel für den Versuchskörper D1 FM (2036652) war dafür deutlich höher als bei dem Versuchskörper D2 FM (598901). Da Versuchskörper D1 FM bereits Anzeichen eines progressiven Risswachstums aufwies, wurde er über die Grenzlastwechselzahl von 2×10^6 Lastwechseln hinaus belastet. Ein Versagen fand schließlich kurz nach dieser Lastwechselzahl statt, weshalb dieser Probekörper nicht als Durchläufer bezeichnet wird.

Ausgehend von den Ergebnissen des Versuchskörpers D2 FM mit einer Rissbreite von 0.4 mm, war für die Untersuchung des Versuchskörpers D4 FM mit der gleichen bezogenen Oberspannung von $S = 0.58$ und einer geringeren Rissbreite von 0.2 mm, ein höherer ertragbarer Lastwechsel erwartet worden, da die „Vorschädigung“ geringer war. Der Versuchskörper D4 FM versagte wider Erwarten bereits aber nach 549852 Lastwechseln.

Beim Versuchskörper D3 FM entstand der Riss unterhalb des Wegaufnehmers. Da die Wegaufnehmer den Dehnungszuwachs nicht aufzeichnen konnten, wurde die Rissentstehung anfangs nicht bemerkt. Der Versuchskörper wurde dadurch bis weit in den *Strain-Softening* Bereich vorbelastet. Die Rissbreite (*Pre-Cracking*) betrug ca. 1.2 mm und die Anzahl der ertragenen Lastwechsel fiel mit 2151 entsprechend gering aus. Für die

Auswertung des Versuchskörpers D3 FM wurde für die Weg-Lastwechsel-Beziehung der aufgezeichnete Maschinenweg herangezogen.

Die Versuchsreihe FM weist im Vergleich zu der Versuchsreihe FH eine größere Streuung der Zugtragfähigkeit zwischen den einzelnen Versuchskörper auf. Prinzipiell ist in der Versuchsreihe FH im Vergleich zu den Versuchen der Serie FM eine geringere Anzahl der ertragenen Lastwechsel zu erkennen.

Bei der Versuchsreihe FH wurde für den Versuchskörper D3 FH eine wesentlich geringere Nachrisszugtragfähigkeit im Vergleich zu anderen Versuchskörpern der Serie FH, aufgezeichnet (siehe Anhang B10). Dies ist auf einen unsachgemäßen Gießvorgang zurückzuführen. Aus diesem Grund wird der Versuchskörper D3 FH für die Auswertungen nicht berücksichtigt.

Für die Versuchskörper D1 FH – D3 FH wurden die Versuche mit der gleichen bezogenen Oberspannung $S = 0.67$ und unterschiedlichen Rissbreiten (0.2, 0.3 und 0.6 mm) durchgeführt. Der Versuchskörper D1 FH mit einer Rissbreite von 0.6 mm ertrug 2251 Lastwechsel, Versuchskörper D3 FH mit einer Rissbreite von 0.3 mm ertrug 3101 Lastwechsel, während Versuchskörper D2 FH mit einer Rissbreite von 0.2 mm 56001 Lastwechsel ertrug.

Bei den Langzeitversuchen konnte für die Serie FM die angestrebten Lastwechsel N von 10^7 (9997451 Lastwechsel) ohne zu Versagen erreicht werden. Im Gegensatz dazu wurde dies bei dem Versuchskörper der Serie FH (2158051) nicht erreicht. Der Versuchskörper LA FM wurde im Anschluss statisch beansprucht, um die Resttragfähigkeit zu ermitteln. Die Resttragfähigkeit des Versuchskörpers LA FM betrug 46.08 kN.

3.6.3 Wöhlerlinien

Um die Ergebnisse der Ermüdungsversuche einzuordnen werden die Wöhlerdiagramme ($S-N$ Diagramme) herangezogen, wo die Ergebnisse von Heinzlreiter [1] eingetragen sind. Die Anzahl der ertragenen Lastwechsel N für eine bezogenen Oberspannung S , wird im halblogarithmischen Maßstab dargestellt.

In Abb. 3.8 ist das Wöhlerdiagramm der FM Rezeptur ersichtlich. Die Funktion der Regressionsgerade, welche in Abb. 3.8 dargestellt ist, ergibt sich zu:

$$\log N = \log(1.9012 \times 10^9) - 6.0297 \times S \text{ (ohne Berücksichtigung der Durchläufer) [1] } \quad (2)$$

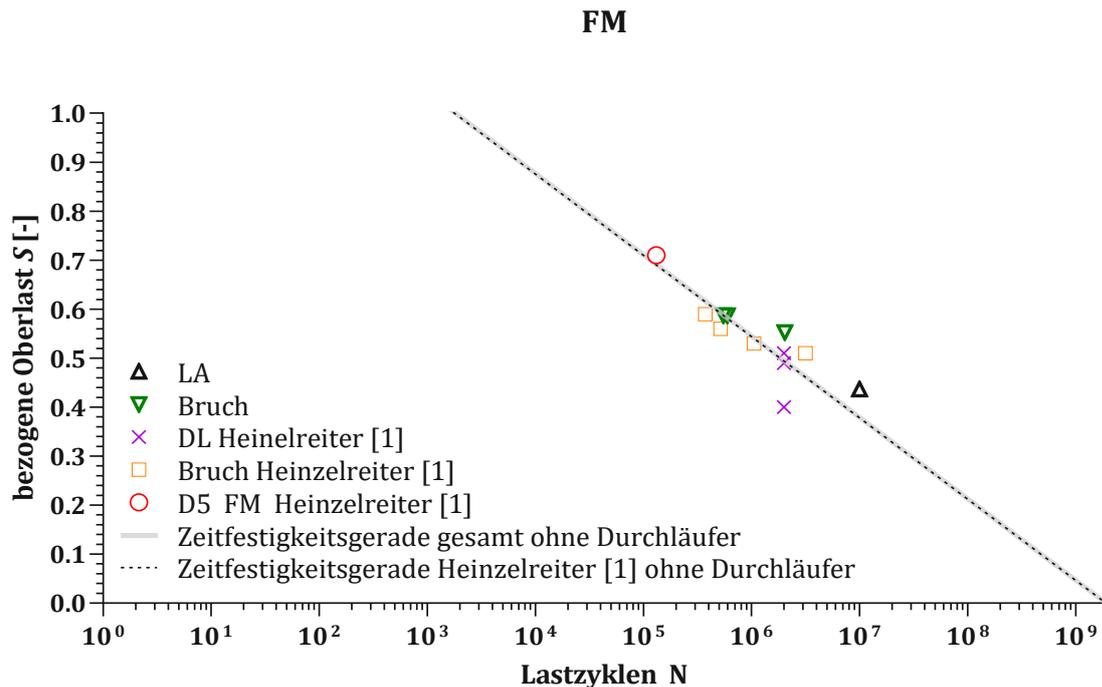


Abb. 3.8: Wöhlerdiagramm der Rezeptur FM

Zusätzlich wurden die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ermüdungswiderstände in das Diagramm eingetragen. Ob während der dynamischen Versuche Brüche auftraten, oder es sich um Durchläufer handelt, ist mit verschiedenen Symbolen gekennzeichnet.

Bestimmt man die Regressionsgeraden in Abb. 3.8, inklusive der Ermüdungswiderstände, die im Zuge dieser Arbeit ermittelt wurden, analog zu jener Methode welche im Rahmen der Diplomarbeit von Heintelreiter [1] vorgestellt und verwendet wurde, ergibt sich die Funktion der Regressionsgerade für die Rezeptur FM zu:

$$\log N = \log(1.9039 \times 10^9) - 6.0210 \times S \text{ ohne Berücksichtigung der Durchläufer} \quad (3)$$

Bei Vergleich der Regressionsgeraden (2) und (3) ist zu erkennen, dass der Unterschied zwischen der ermittelten Regressionsgeraden vernachlässigbar ist. Es ist hier aber nochmal anzumerken, dass die Versuchskörper D1 FM und D2 FM eine größere Rissbreite als in der Arbeit von Heintelreiter [1] aufweisen. Die Ermüdungswiderstände, die in dieser Arbeit ermittelt wurden, erscheinen demnach etwas höher als in der Arbeit von Heintelreiter [1].

Wie in Abb. 3.8 zu erkennen ist, wies Versuchskörper D5 FM aus Heintelreiter [1] eine überproportional höhere ertragene Lastwechselzahl bei einer bezogenen Oberspannung S von 0.7 auf. Die ermittelten Regressionsgeraden (2) und (3) wurden durch dieses Ergebnis stark beeinflusst. In Abb. 3.9 ist das Wöhlerdiagramm der FM Rezeptur ohne Berücksichtigung des Versuchskörpers D5 FM dargestellt. Bei Bestimmung der Regressionsgeraden (4) in Abb. 3.9 wurde der Ermüdungswiderstand des Versuchskörpers D5 FM ebenfalls nicht berücksichtigt.

Die Funktionen der Regressionsgerade, welche in Abb. 3.9 eingetragen ist, ergibt sich zu:

$$\log N = \log(6.8717 \times 10^{11}) - 10.7589 \times S \text{ (ohne Berücksichtigung der Durchläufer) [1] (4)}$$

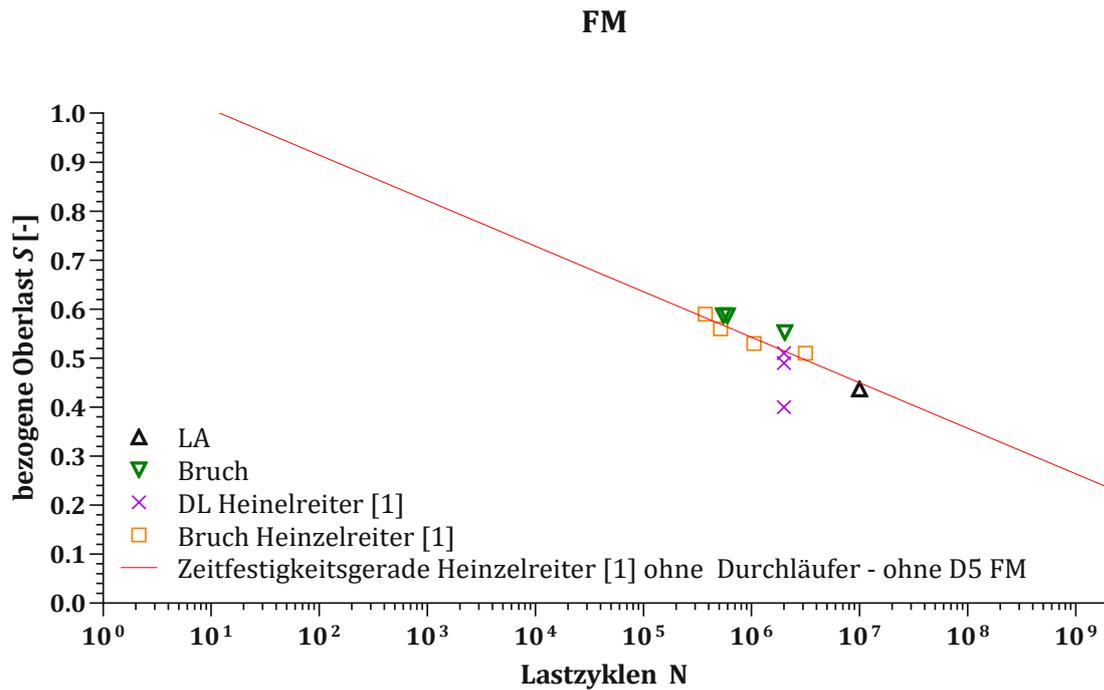


Abb. 3.9: Wöhlerdiagramm der Rezeptur FM – ohne Berücksichtigung des Versuchskörpers D5 FM

Es lässt sich feststellen, dass sämtliche Prüfkörper der Sorte FM aus dieser Arbeit über der Wöhlerkurve aus Heinzlreiter [1] liegen. Dies bekräftigt den Eindruck, dass die Charge in diesen Untersuchungen eine generell etwas höhere (Ermüdungs-)festigkeit aufwies.

In Abb. 3.10 sind die Ergebnisse der Ermüdungswiderstände der Sorte FH sowohl der eigenen Versuche als auch der von Heinzlreiter [1] dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Versuchsreihe FH dieser Serie im Gegenteil zur Serie FM geringere Ermüdungswiderstände im Vergleich zur Arbeit von Heinzlreiter [1] aufweist. In Abb. 3.10 wird für die Versuchsreihe FH die Regressionsgerade getrennt anhand der ermittelten Widerstände in den jeweiligen Arbeiten eingetragen.

Die Funktionen der Regressionsgeraden für die Rezeptur FH, welche in Abb. 3.10 dargestellt sind, ergeben sich zu:

$$\log N = \log(7.2466 \times 10^{15}) - 15.7238 \times S \text{ (ohne Berücksichtigung der Durchläufer [1])} \quad (5)$$

FH

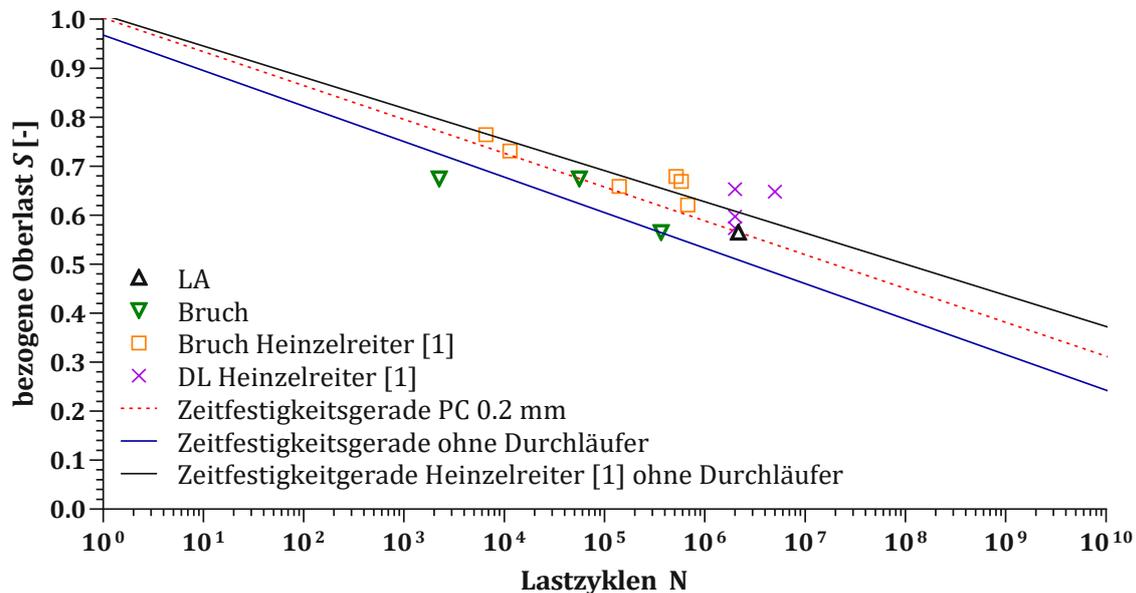


Abb. 3.10: Wöhlerdiagramm der Rezeptur FH

Es ist eine quasiparallele Verschiebung der Regressionsgerade eindeutig zu erkennen.

Da die Versuchsserie FH im Rahmen dieser Diplomarbeit mit unterschiedlichen Rissbreiten (0,2, 0,4 und 0,6 mm) untersucht wurde, während die im Rahmen der Arbeit von Heinzlreiter [1] nur mit einer Rissbreite von ca. 0,2 mm untersucht wurde, wurde in Abb. 3.10 die Regressionsgerade der Versuchskörper D2 FH (PC 0,2) und LA FH (PC 0,2) zusätzlich eingetragen.

Die Funktion der Regressionsgerade für die Rezeptur FH mit einer Rissbreite von 0,2 mm, welche in Abb. 3.10 dargestellt ist, ergibt sich zu:

$$\log N = \log(3.3093 \times 10^{14}) - 14.4828 \times S \text{ (ohne Berücksichtigung der Durchläufer)} \quad (6)$$

Beim Vergleich der Regressionsgeraden (6) und (8) ist nochmal genauer zu erkennen, dass die Versuchsreihe FH dieser Serie geringere Ermüdungswiderstände im Vergleich zur Arbeit von Heinzlreiter [1] aufweist.

3.6.4 Cycle Creep Curves

Bei Ermüdungsversuchen wird die Zunahme der Verformungen über die Lastwechsel als Funktion der ertragbaren Lastzyklen dargestellt [3]. Diese Kurven werden als „Cycle Creep Curves“ bezeichnet [3] und repräsentieren den Schädigungsverlauf im Beton unter zyklischer Beanspruchung. Wie in Kapitel 2.1.3.3 angeführt, können diese Kurven in drei Phasen eingeteilt werden [4]. Phase I entspricht der Phase der Rissentstehung [8] und ist durch eine große Zunahme der Verformung aufgrund der bereits existierenden Mikrorisse charakterisiert [4]. Phase II bezeichnet den stabilen Rissfortschritt [8]. Dabei nimmt die Verformung gleichmäßig zu [3]. Phase III repräsentiert das schnelle instabile Risswachstum [8] bis zum Versagen [4].

Abb. 3.11 und Abb. 3.12 stellen die Schädigungsverläufe der Versuchsreihen FM und FH dar. Dabei werden die Verformungen bei Oberlast als Funktionen der bezogenen Lastwechselzahl (das Verhältnis zwischen den tatsächlichen Lastzyklen n zu den max. ertragbaren Lastzyklen bis zum Bruch N) eingetragen. Da die dynamischen Versuche an vorgerissenen (*Pre-Cracked*) Versuchskörpern durchgeführt wurden, sind nur die Phasen II und III ersichtlich. Um den Übergang von Phase II in die Phase III in Abb. 3.11 und Abb. 3.12 einzutragen, wurden die „Cycle Creep Curves“ der einzelnen Versuchskörper analysiert. Graphisch lässt sich dieser durch die Steigung der Kurve in der Phase III (wird steiler) erkennen.

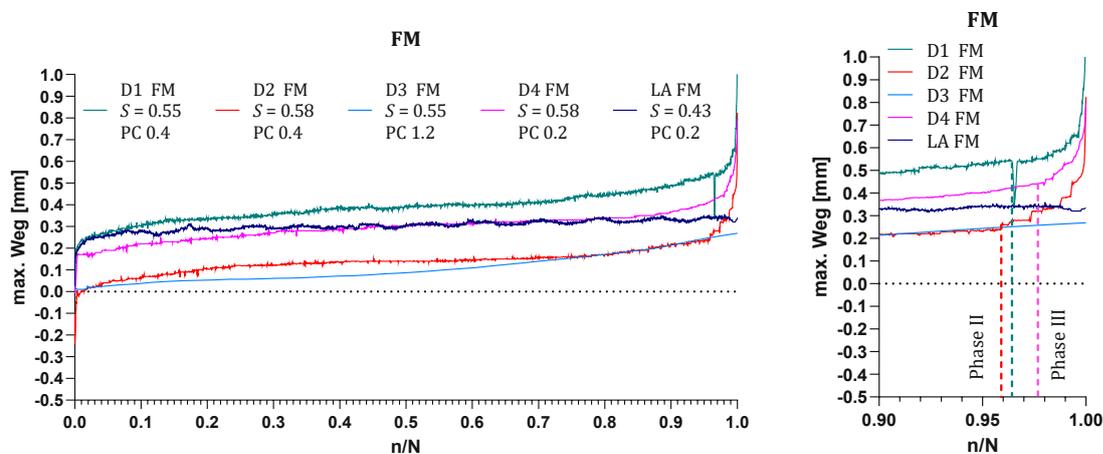


Abb. 3.11: Cycle Creep Curves für die FM -Versuchsreihe

Der Schädigungsverlauf des Versuchskörpers LA FM repräsentiert den Schädigungsverlauf eines Durchläufers. Dabei ist nur die Phase II zu erkennen, da der Versuchskörper LA FM ca. 10^7 Lastwechsel ohne zu versagen erreichte.

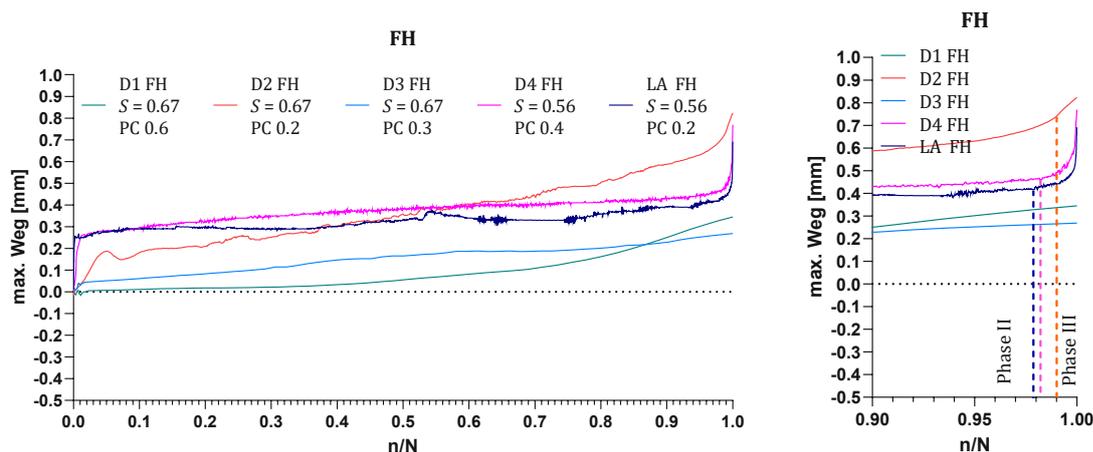


Abb. 3.12: Cycle Creep Curve für die FH – Versuchsreihe

Ein Übergang von Phase II in Phase III ist auch bei dem Versuchskörper D3 FH nicht ersichtlich. In dem Fall brach der Versuchskörper unter Ermüdungsbeanspruchung schlagartig und ohne Vorankündigung. Dies ist auf die bereits in Kapitel 3.6.2 unsachgemäße Verteilung der Fasern zurückzuführen, weshalb dieser Versuchskörper als nicht repräsentativ anzusehen ist.

Tab. 3.7 zeigt die mittleren Rissöffnungsraten in Phase II und die bei dem Übergang von der Phase II in die Phase III aufgezeichneten, Lastzyklen N und die Mittelwerte der min. und max. Verformungen, die durch die Wegaufnehmer aufgezeichnet wurden.

Die Berechnung der Rissöffnungsraten erfolgte mit folgender Formel:

$$\frac{dw}{dn} = \frac{w_{l,max} - w_{k,max}}{l - k} \quad (7)$$

$w_{l,max}$ bzw. $w_{k,max}$ ist der Mittelwert der max. Verformungen, der durch Wegaufnehmer für den l -Zyklus bzw. k -Zyklus aufgezeichnet wurde. $(l-k)$ ist die Anzahl der Lastzyklen zwischen dem l -Zyklus und k -Zyklus.

Tab. 3.7: Rissöffnungsrate in Phase II und die max. und min. Verformungen im Messbereich beim Übergang von Phase II in Phase III (Mittelwerte der Wegaufnehmermessungen)

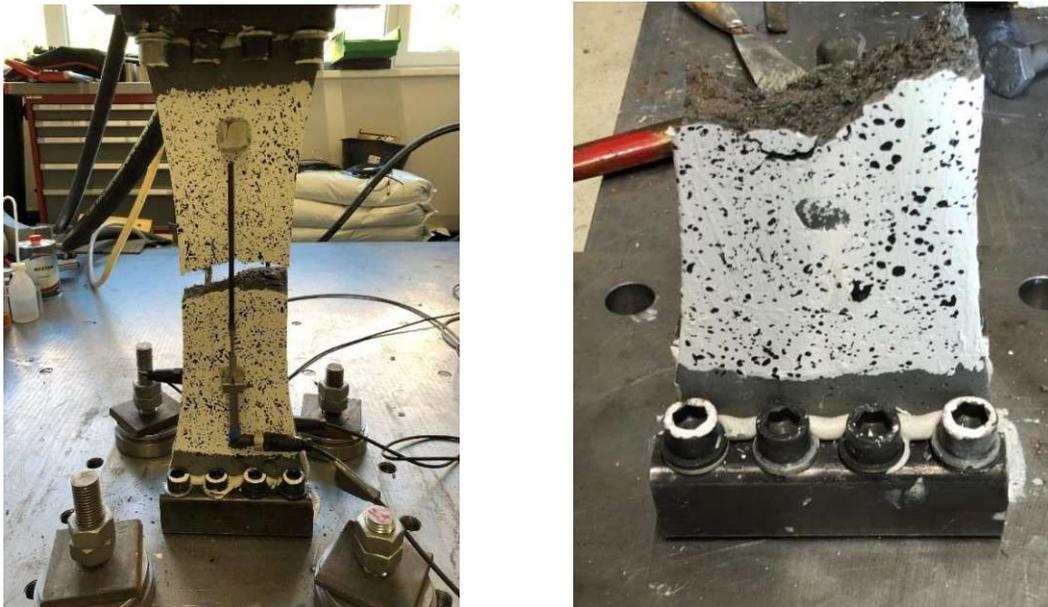
Bezeichnung	Rissöffnungsrate $\frac{dw}{dn}$ (Phase II) [mm/Zyklus]	Lastzyklen N	w_{max} [mm]	w_{min} [mm]
D1 FM 55.26 PC 0.4	7.57×10^{-8}	1974315	0.549	0.420
D2 FM 58.71 PC 0.4	3.12×10^{-7}	574724	0.469	0.401
D4 FM 58.71 PC 0.2	$1,09 \times 10^{-7}$	522368	0.235	0.159
D2 FH 67.47 PC 0.2	4.74×10^{-6}	54022	0.297	0.194
D4 FH 56.52 PC 0.4	3.60×10^{-7}	360372	0.408	0.246
LA FH 56.52 PC 0.2	7.74×10^{-8}	2114338	0.342	0.232

Bei der Serie FM weisen die Versuchskörper D1 FM, D2 FM und D4 FM während der Phase II ca. die gleiche stabile Steigung (Zunahme der Verformungen) auf. Die Versuchskörper D4 FH und LA FH wurden mit der gleichen bezogenen Oberspannung $S=0.56$ und unterschiedlichen Rissbreiten (*Pre-Cracking*) untersucht. Der Unterschied an der Rissbreite lässt sich an der vertikalen Verschiebung der Kurve der Versuchskörper D4 FH (PC 0.4) gegenüber dem vom Versuchskörper LA FH (PC 0.2) erkennen. Die Schädigungsverläufe der Versuchskörper D4 FH und LA FH weisen ca. die gleiche stabile Steigung (Zunahme der Verformungen) in der Phase II auf. Selbiges Verhalten kann auch für Versuchskörper D1 DH und D2 FH beobachtet werden. Bei beiden Versuchskörpern war die bezogene Oberlast $S=0.67$, jedoch wiesen sie eine unterschiedliche Rissbreite vor Belastungsbeginn auf. Der Schädigungsverlauf scheint demnach augenscheinlich von der Spannungsamplitude und nicht von der Rissbreite vor Belastungsbeginn abzuhängen. Retrospektiv lässt sich dieses Verhalten auch bei der Serie FM erkennen. Bei der Serie FH weist der Versuchskörper D2 FH sowohl in der Phase II als auch in der Phase III die stärkste Steigung (Zunahme der Verformungen) auf.

3.6.5 Bruchbild der Ermüdungsversuche unter Zugschwellbeanspruchung

Um das Materialversagen zu verstehen, können die Bruchflächen sehr wichtige Informationen liefern [2]. Die Beschreibung und Beurteilung von Bruchflächen heißt Fraktographie [10]. Die im Rahmen dieser Diplomarbeit untersuchten Versuchskörper unter Zugschwellbeanspruchung wiesen verschiedene Bruchbilder auf.

Bei der Versuchsreihe FM wurde in der Regel ein Bruch nahezu senkrecht zur Kraftachse beobachtet. Diese Art von Versagen wurde prinzipiell auch bei der Versuchsreihe FH beobachtet, mit dem Unterschied, dass der Bruch eine stärkere Neigung von der senkrecht zur Kraftachse orientierten Fläche aufwies.



(a)

(b)

Abb. 3.13: Versagen der Versuchskörper unter Zugschwellbeanspruchung (a) Versuchskörper D4 FM (b) Versuchskörper FH LA

In der Literatur [2] wird jener Mechanismus, bei dem die Fasern aus der Matrix zum Teil oder vollständig herausgezogen werden, und wo die Ausziehrichtung nicht der Faserrichtung entspricht, als *Snubbing* bezeichnet. *Snubbing* ist durch Abplatzungen von kleinen Matrixstücken, pulverisierter Matrix sowie gebogenen Fasern charakterisiert [2]. Im Rahmen der Untersuchungen dieser Diplomarbeit wurde *Snubbing* besonders auf der Bruchfläche des Versuchskörpers D2 FM beobachtet (siehe Abb. 3.14).



Abb. 3.14: Bruchfläche mit Snubbing – Versuchskörper D2 FM

Weiters wird in der Literatur [2] der Ort der Rissinitiierung als jener Bereich angesehen, der mit einem glatteren Bereich der Bruchfläche übereinstimmt. Die glatte Oberfläche weist meistens weniger Faseranteile im Vergleich zu der restlichen Fläche auf. Dieser Mechanismus lässt sich durch zwei Prozesse erklären [2]:

- Während der Herstellung der UHPFRC Versuchskörper kommt es zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Fasern und infolgedessen entstehen Bereiche im Prüfkörper, die geringere Faseranteile enthalten. In diesen Bereichen können folglich weniger Zugspannungen übertragen werden, was zu einer früheren

Rissbildung führt. Unter Einwirkung der zyklischen Belastung werden diese Rissoberflächen abgeschliffen und abgenutzt.

- Der zweite Prozess ist die Tribokorrosion, welche zum Bruch der Fasern führen kann. Die Zugspannungen werden durch die Fasern in den Risszonen in Verbindung mit der Matrix überbrückt. Aufgrund der Be- und Entlastung während der zyklischen Beanspruchung werden die Fasern aus der Matrix herausgezogen und rutschen zum Teil wieder in das Auszugsloch hinein. Dabei geht der Haftverbund zwischen Fasern und Matrix verloren und gleichzeitig werden die Oberflächen der Fasern abgenutzt. Aufgrund der reduzierten Oberfläche der Fasern folgt schlussendlich eher ein Bruch der Fasern anstelle eines Herausziehens.

Tribokorrosion, welche von Rost begleitet wird, ist bei der Bruchfläche des Versuchskörpers D1 FM (siehe Abb. 3.15) eindeutig zu erkennen. Weiters ist ein glatter Bereich mit wenig Fasern sowie ein rauher Bereich mit beinahe senkrecht stehenden Fasern ersichtlich. Dies lässt auf die Restbruchfläche schließen. Ein ähnliches Bruchbild ist auch bei den Versuchskörpern D2 FM und D4 FM der Versuchsreihe FM sowie auf dem Versuchskörper LA FH der Versuchsreihe FH zu erkennen (siehe Anhang).



Abb. 3.15: Bruchfläche mit Tribokorrosion – Versuchskörper D1 FM

Wie in Abb. 3.10 zu erkennen, wies die Versuchsreihe FH einen sehr geringen Ermüdungswiderstand auf. Dieses Verhalten der Versuchskörper der Versuchsreihe FH unter Ermüdungsbeanspruchung ist zum Teil auf die ungleichmäßige und ungünstige Orientierung der Fasern zurückzuführen. Abb. 3.16 repräsentiert die Bruchfläche des Versuchskörpers D3 FH, in der der geringe Anteil der Fasern zu erkennen ist. Dieses Bruchbild ist charakteristisch für die Versuchskörper der Versuchsreihe FH. Darüber hinaus ist aus den bisher gesammelten Erkenntnissen davon auszugehen, dass die Zugtragfähigkeit der Charge, die in dieser Arbeit untersucht wurde, geringer ist als jene von Heinzlreiter [1]. Dadurch waren die gewählten Belastungen relativ gesehen sehr groß, wodurch es zu einem Gewaltbruch als zu einem progressiven Auszug der Fasern kam. Ursache dafür könnte eine zu schnelle Befüllung der Schalung gewesen sein, wodurch es zu Verwirbelungen der Fasern gekommen ist.



Abb. 3.16: Bruchbild des Versuchskörpers D3 FH

3.6.6 Post-Dynamisches Verhalten

Versuchskörper LA FM erreichte ca. zehn Millionen Lastwechsel unter dynamischer Beanspruchung und wurde als Durchläufer bezeichnet. Um die Resttragfähigkeit dieses Versuchskörpers zu bestimmen, wurde dieser Versuchskörper statisch wiederbelastet.

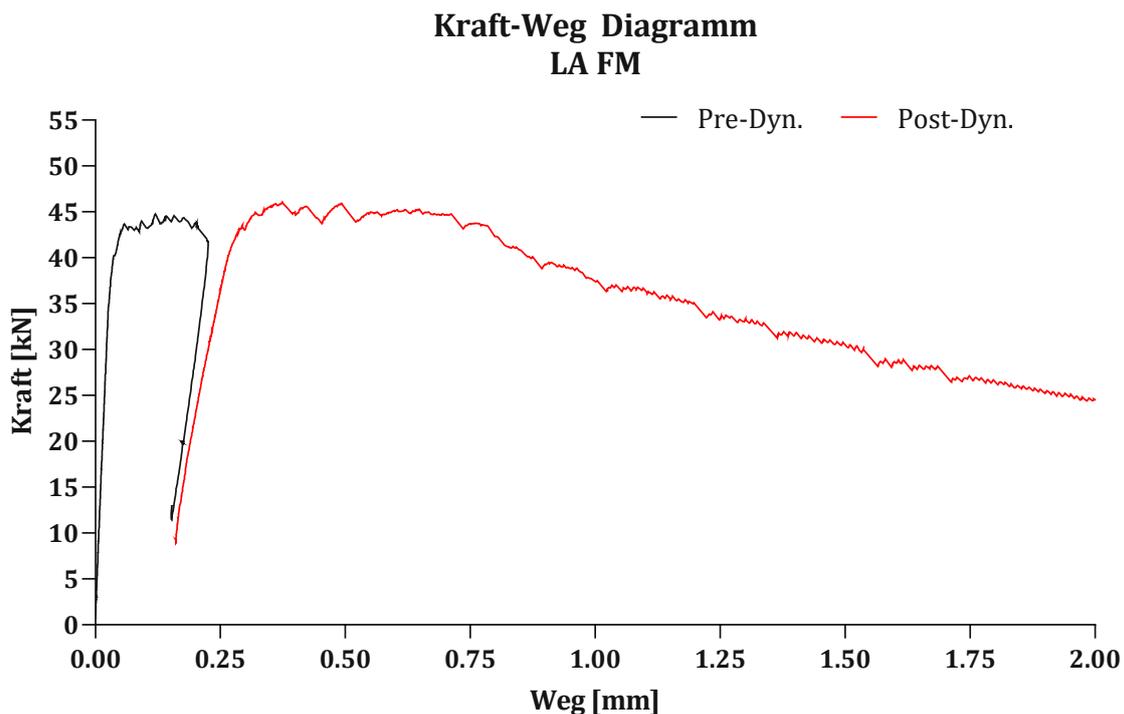


Abb. 3.17: Spannungs-Dehnungs-Linie der Versuchskörper LA FM vor und nach der dynamischen Belastung

Wie in Abb. 3.17 zu erkennen ist, hat sich die Spannungs-Dehnungs-Linie des Versuchskörpers LA FM bei post-dynamischer Belastung in horizontale Richtung verschoben. Diese Dehnungszunahme ist auf das Risswachstum in dem UHPFRC-Versuchskörper unter zyklischer Beanspruchung zurückzuführen [4]. Allerdings scheint der vorher induzierte Schaden unter zyklischer Beanspruchung nicht die Zugtragfähigkeit der UHPFRC-Versuchskörper zu beeinflussen.

3.6.7 Interpretation der Ergebnisse

Wie bereits in dem Kapitel 3.6.2 beschrieben wurde, betrug die Rissbreite (*Pre-Cracking*) bei den Versuchskörpern D1 FM und D2 FM 0.4 mm, wobei die bezogene Oberspannung S bei dem Versuchskörper D2 FM ca. 5.9% höher war. Aus der Anzahl der ertragenen Lastwechsel für die Versuchskörper D1 FM (2036652) und D2 FM (598901) kann die Erkenntnis gewonnen werden, dass die bezogene Oberspannung einen wesentlichen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten hat. Carlesso [6] beschreibt im Rahmen ihrer Dissertation zudem, dass die Erhöhung der bezogenen Oberspannung, eine steilere „Cycle Creep Curve“ in der Phase II zur Folge hat. Dies ist insbesondere bei den „Cycle Creep Curves“ der Serie FH ersichtlich (siehe Abb. 3.12).

Die Versuchskörper D1 FH und D3 FH sowie D4 FH und LA FH wurden mit der gleichen bezogenen Oberspannung $S=0.67$ bzw. $S=0.56$ und unterschiedlichen Rissbreiten (0.2, 0.4 und 0.6 mm) untersucht. Der Einfluss der Rissbreite (*Pre-Cracking*) auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC ist an der Anzahl der ertragenen Lastwechsel eindeutig zu erkennen. Versuchskörper D1 FH mit einer Rissbreite von 0.6 mm ertrug 2251 Lastwechsel, während der Versuchskörper D2 FH mit einer Rissbreite von 0.2 mm 56001 Lastwechsel ertrug. Ähnliches ergibt sich im Vergleich von Versuchskörper D4 FH mit einer Rissbreite von 0.4 mm und LA FH mit einer Rissbreite von 0.2 mm. Der Versuchskörper D4 FH ertrug 360372 Lastwechsel, während der Versuchskörper LA FH 2114338. Diese Beobachtung lässt sich auch bei den Versuchsreihen von Plizzari et al. [25] und Makita et al. [2] finden (siehe Kapitel 2.1.3.2.1 und 2.1.3.2.2).

In der Versuchsreihe FH ist, im Vergleich zu der Versuchsreihe derselben Sorte in der Arbeit von Heinzlreiter [1], eine geringe Anzahl der ertragenen Lastwechsel zu erkennen. Ein Grund dafür kann ein geringer Anteil von Fasern in der Bruchzone sein, der auf eine ungleichmäßige und ungünstige Orientierung der Fasern zurückzuführen ist (siehe B.10 Versuch D3 FH 67.47 PC 0.3). Diese Schlussfolgerung wurde aus der Analyse des Bruchbildes entnommen. Das bestätigt die Schlussfolgerung von Carlesso et al. [4], dass die Dauerschwingfestigkeit von vorgerissenen (*Pre-Cracked*) UHPFRC Versuchskörpern, das Ergebnis einer probabilistischen Streuung in Faserorientierung und Verteilung ist (siehe 2.1.3.2.3). Eine mögliche weitere Ursache für dieses Verhalten kann sein, dass für diese Charge ein neuer Sack Mikrosilika geöffnet werden musste, da der vorherige Sack, der für die Versuche von Heinzlreiter [1] und der Serie FM dieser Arbeit herangezogen wurde, zur Neige gegangen war. Dies verdeutlicht noch einmal die inhärenten Streuungen der Ausgangsstoffe, die Auswirkungen auf das Materialverhalten des Kompositwerkstoffes haben.

Kapitel 4

4 Beurteilung des Einflusses der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Rissbreite (*Pre-Cracking*) auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC anhand der „Cycle Creep Curves“ und Wöhlerdiagramme beurteilt.

4.1 Auswertung anhand der Cycle Creep Curves

Wie bereits in dem Kapitel 3.6.4 beschrieben wurde und in den „Cycle Creep Curves“ (siehe Abb. 3.11 und Abb. 3.12) zu erkennen war, wiesen die Versuchskörper der Reihe FM und FH unter Ermüdungsbeanspruchung in der Phase II des Schädigungsverlaufes in Abhängigkeit der aufgetragenen Oberlast einen unterschiedlichen Verformungszuwachs (Rissöffnungsrate (dw/dn)) auf. Damit verbunden war ein Unterschied bei den Mittelwerten der max. aufgezeichneten Verformungen beim Übergang von Phase II in die Phase III zu erkennen. Ausgehend von dieser Beobachtung, wird im Folgenden der Einfluss der Rissbreite und der bezogenen Oberspannung S auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung anhand der max. auftretenden Dehnungen ϵ im UHPFRC-Versuchskörper vor dem Übergang in das instabile Risswachstum (Übergang Phase II-III) beurteilt.

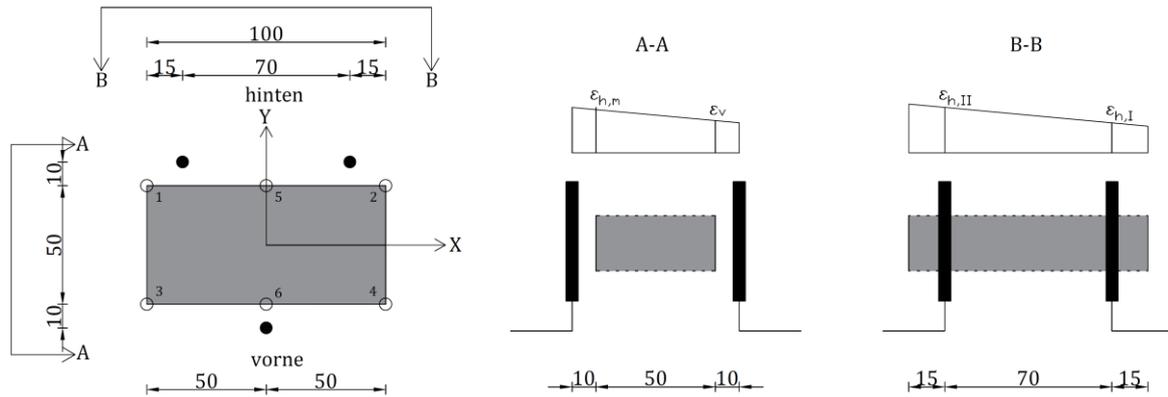


Abb. 4.1: Position der Wegaufnehmer an den UHPFRC Versuchskörpern

Die max. auftretenden Dehnungen in den einzelnen Versuchskörpern wurden wie folgt ermittelt:

- Im ersten Schritt wurden aus den aufgezeichneten max. Verformungen, die durch die Wegaufnehmer erfolgten, die Dehnungen berechnet. Die Wegaufnehmer hatten eine Basislänge von $l_0=200$ mm. Die Position der Wegaufnehmer mit den Abständen sowie die Abmessungen des Versuchskörpers sind in Abb. 4.1 illustriert.

$$\varepsilon_{h,I} = \frac{W_{max,h,I}}{l_0} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{h,II} = \frac{W_{max,h,II}}{l_0} \quad (9)$$

$$\varepsilon_v = \frac{W_{max,v}}{l_0} \quad (10)$$

- Durch die Position der Wegaufnehmer (siehe Abb. 4.1) im hinteren Bereich des Versuchskörpers war eine Dehnungsebene vordefiniert. Aus der Differenz der Dehnungen und dem Abstand zwischen dem Wegaufnehmer konnte die Steigung s_1 berechnet werden. Der horizontale Abstand zwischen dem Wegaufnehmer betrug $a = 70$ mm.

$$s_1 = \frac{\varepsilon_{h,II} - \varepsilon_{h,I}}{a} \quad (11)$$

- Für die Ermittlung der Dehnungsebene in y-Richtung wurde zuerst der Mittelwert der Dehnungen im hinteren Bereich des Versuchskörpers berechnet:

$$\varepsilon_{h,m} = \frac{\varepsilon_{h,II} + \varepsilon_{h,I}}{2} \quad (12)$$

4 Beurteilung des Einflusses der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC

- Die Steigung s_2 der Dehnungsebene in y-Richtung, wurde aus der Differenz der mittleren Dehnung im hinteren Bereich des Versuchskörpers mit der vorderen, dividiert durch den Abstand, berechnet. Der vertikale Abstand zwischen dem Wegaufnehmer vorne und hinten betrug $a_{v-h} = 70$ mm.

$$s_2 = \frac{\varepsilon_{h,m} - \varepsilon_v}{a_{v-h}} \quad (13)$$

- Nachdem die Steigung s_2 ermittelt wurde, wurden die max. Dehnungen an den Punkten 5 und 6 berechnet (siehe Abb. 4.1). Der vertikale Abstand der Wegaufnehmer zu den Punkten 5 und 6 betrug 10 mm.

$$\varepsilon_5 = \varepsilon_{h,m} + s_2 * 10mm \quad (14)$$

$$\varepsilon_6 = \varepsilon_v - s_2 * 10mm \quad (15)$$

- Ausgehend von den Punkten 5 und 6 wurden die Dehnungen an den Eckpunkten 1, 2, 3 und 4 berechnet.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{h,II} + s_1 * 50 mm \quad (16)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{h,I} - s_1 * 50 mm \quad (17)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_5 + s_1 * 50mm \quad (18)$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_6 + s_1 * 50mm \quad (19)$$

- Die max. berechnete Dehnung der einzelnen Versuchskörper beim Übergang von Phase II in die Phase III ist in Tab. 4.1 sowie in die Abb. 4.2 bzw. Abb. 4.3 eingetragen.

Tab. 4.1: Max. Dehnungen beim Übergang von Phase II in Phase III

Bezeichnung	Lastzyklen N	W_{max} [mm]	max. Dehnungen [mm/m]
D1 FM 55.26 PC 0.4	1974315	0.549	2.891
D2 FM 58.71 PC 0.4	574724	0.469	2.556
D4 FM 58.71 PC 0.2	522368	0.235	2.140
D2 FH 67.47 PC 0.2	54022	0.297	3.678
D4 FH 56.52 PC 0.4	360372	0.408	2.390
LA FH 56.52 PC 0.2	2114338	0.342	2.085

Um die ermittelten max. Dehnungen im UHPFRC beim Übergang von Phase II in Phase III einzuordnen, wurden die Spannung-Dehnungs-Diagramme der statischen Versuche herangezogen. Abb. 4.2 stellt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Versuchskörpers S1 FM dar.

Für die Versuchsreihe FH konnte das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Versuchskörper S1 FH nicht herangezogen werden, da der Riss außerhalb des Messbereiches der Wegaufnehmer entstand und somit der Gesamtverlauf nicht aufgezeichnet werden konnte. Um die max. Dehnungen im UHPFRC beim Übergang von Phase II in Phase III trotzdem einordnen zu können, wurde aus diesem Grund hier das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Versuchskörpers S4 FH der Arbeit von Heinzlreiter [1] herangezogen.

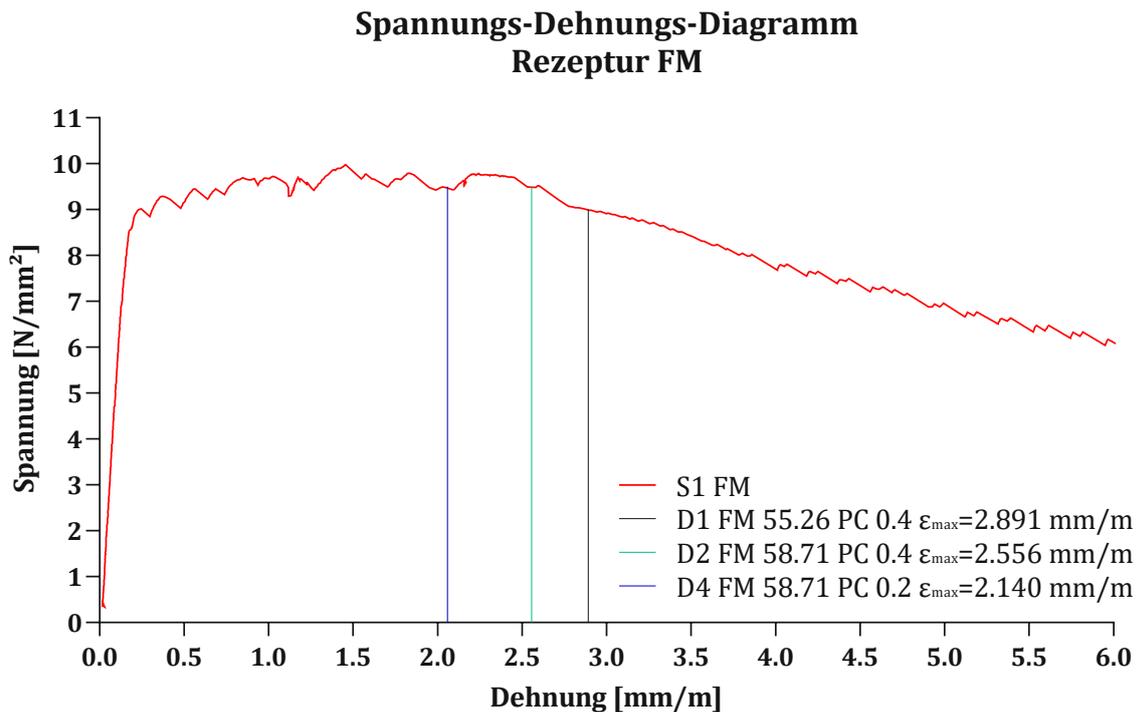


Abb. 4.2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Rezeptur FM

Spannungs-Dehnungs-Diagramm Rezeptur FH

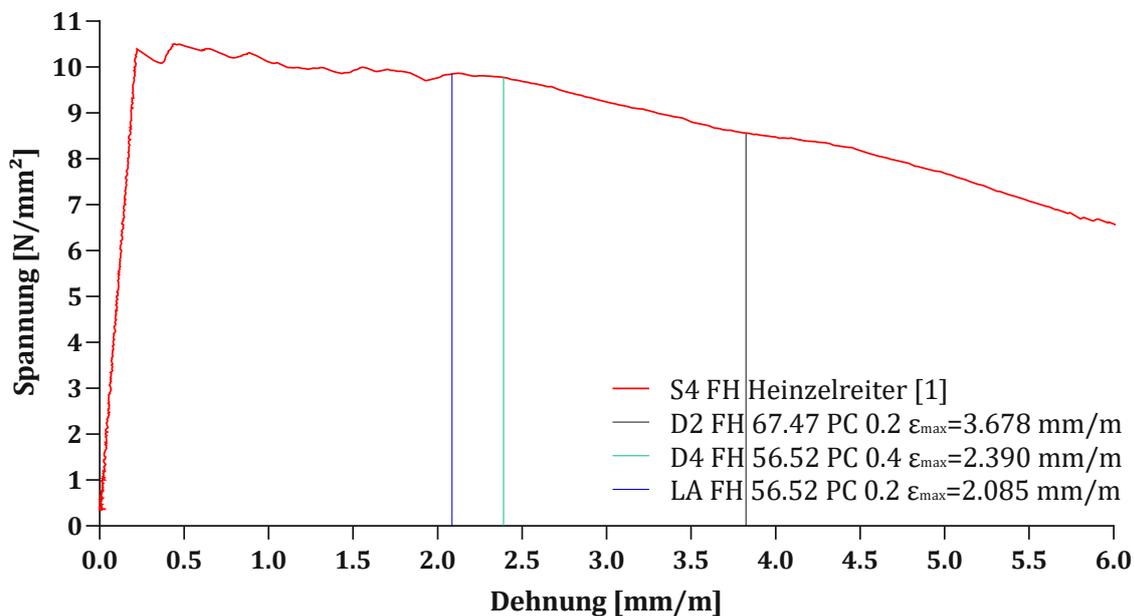


Abb. 4.3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Rezeptur FH

Wie in Abb. 4.2 und Abb. 4.3 zu erkennen ist, lassen die Versuchskörper der Reihe FM und FH keinen signifikanten Trend bezüglich des Einflusses der bezogenen Oberspannung S auf die max. Dehnungen im UHPFRC erkennen. Der Vergleich der max. Dehnung des Versuchskörpers D1 FM ($S=0.56$; PC 0.4) mit dem des Versuchskörpers D2 FM ($S=0.59$; PC 0.4) ergibt bei höheren bezogene Oberspannungen S niedrigere max. Dehnungen beim Übergang von Phase II in Phase III. Dem wird aber durch den Vergleich der max. Dehnungen der Versuchskörper D2 FH und LA FH der Reihe FH widersprochen.

Eine wesentliche Erkenntnis kann durch das Eintragen der max. ermittelten Dehnungen beim Übergang von Phase II in Phase III in die Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Versuchsreihe FM und FH, gewonnen werden. Dieser Übergang stimmt in der Regel mit dem *Strain-Softening* Bereich der statischen Kurve überein (siehe Abb. 4.2 und Abb. 4.3). Einzige Ausnahme hiervon bildet D2 FH. Eine genauere Analyse zeigte jedoch, dass es bei diesem Versuchskörper zu einer starken Verdrehung um beide Achsen zufolge der fortschreitenden Rissbildung gekommen ist, sodass hier die Dehnungsebene sehr stark geneigt ist und die max. Dehnung einen sehr prägnanten Peak in diesem Fall darstellt. Der gemittelte Wert entlang der Seitenkante liegt hier mit einer Dehnung von 3.296 mm/m wesentlich näher am *Strain-Hardening* Bereich.

4.2 Auswertung anhand der Wöhlerdiagramme

Wie im Kapitel 3.6.3 beurteilt wurde, wiesen die aus den Ermüdungsversuchen ermittelten Widerstände der Versuchsreihe FM dieser Diplomarbeit, trotz der größeren Rissbreite, höhere Werte im Vergleich zu der untersuchten Reihe FM von Einzelreiter

4 Beurteilung des Einflusses der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC

[1] auf. Dies lässt sich im Wöhlerdiagramm (siehe Abb. 3.8) erkennen und ist auf die höhere Matrixfestigkeit zurückzuführen. Ausgehend von der Streuung der Matrixfestigkeit und der geringen Variation der Rissbreiten der untersuchten Versuchskörper, ist eine Auswertung bezüglich des Einflusses der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung anhand des Wöhlerdiagrammes der Rezeptur FM nicht zielführend.

Für eine Beurteilung des Einflusses der Rissbreite, wurde stattdessen das Wöhlerdiagramm der Sorte FH der Arbeit von Heinzlreiter [1] herangezogen. Zusätzlich wurden die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ermüdungswiderstände in das Diagramm eingetragen (siehe Abb. 4.4). Die in Abb. 4.4 eingetragenen Ergebnisse der Ermüdungsversuche sind Ermüdungswiderstände von Versuchskörpern, welche mit einer Rissbreite (*Pre-Cracking*) von 0.2, 0.4, und 0.6 mm untersucht wurden.

Die Funktion der Regressionsgerade für die Rezeptur FH, welche in Abb. 4.4 dargestellt ist, ergibt sich zu:

$$\log N = \log(7.2466 \times 10^{15}) - 15.7238 \times S \text{ (ohne Berücksichtigung der Durchläufer [1])} \quad (20)$$

Dies wurde nur anhand der ermittelten Ermüdungswiderstände der Arbeit von Heinzlreiter [1] bestimmt.

Um die Beurteilung des Einflusses der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung zu erhalten, wird die Regressionsgerade (20) zu den erhaltenen Ermüdungswiderständen bei unterschiedlichen Rissbreiten parallel verschoben. Diese Methode wurde aufgrund der geringen Anzahl an Versuchskörpern gewählt. Aus den bisherigen Erkenntnissen aus den „Cycle Creep Curves“ und den max. Dehnungen bei Beginn des instabilen Risswachstums scheint diese Vorgehensweise gerechtfertigt.

Durch die parallele Verschiebung der Regressionsgerade (20) zu den Ermüdungswiderständen der Versuchskörper D2 FH und LA FH, wird auf den geringeren Ermüdungswiderstand der Versuchsreihe FH dieser Serie eingegangen. Es ist hier anzumerken, dass die Versuchskörper D2 FH und LA FH die gleiche Rissbreite wie die in der Arbeit von Heinzlreiter [1] aufwiesen.

FH

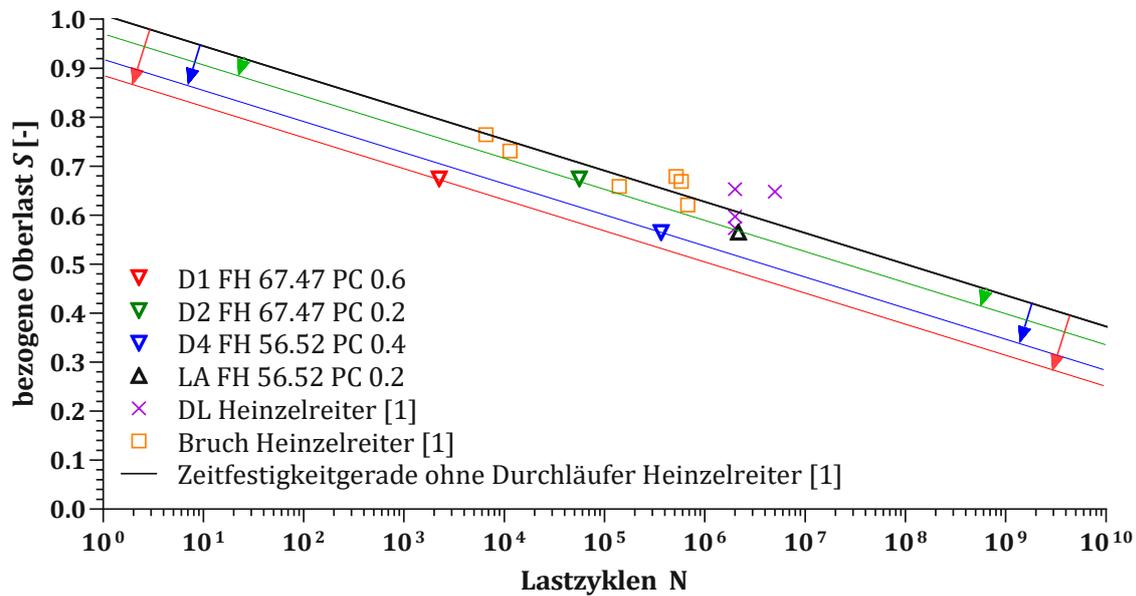


Abb. 4.4: Wöhlerdiagramm für die Beurteilung des Einflusses der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung

Die Versuchskörper D4 FH und D1 FH wurden mit einer Rissbreite von 0.4 mm bzw. 0.6 mm untersucht. Wie in Abb. 4.4 zu erkennen ist, bewirken größere Rissbreiten, eine größere parallele Verschiebung der Regressionsgerade (20). Eine Verschiebung der Regressionsgerade in Richtung des Koordinatenursprunges entspricht einem geringeren Ermüdungswidersand.

Aus der verschobenen Regressionsgerade können für die Versuchskörper der Reihe FH in Abhängigkeit der Rissbreite folgende bezogene Dauerschwingfestigkeiten S_D bei einer Lastwechselobergrenze von zwei Millionen Lastwechseln festgelegt werden (siehe Tab. 4.2):

Tab. 4.2: Bez. Dauerschwingfestigkeit S_D in Abhängigkeit der Rissbreite für die Versuchskörper der Reihe FH

Rissbreite (Pre-Cracking) [mm]	bezogene Dauerschwingfestigkeit S_D [-]
0.2	0.57
0.4	0.53
0.6	0.49

Die bezogene Dauerschwingfestigkeit S_D des Versuchskörpers mit einer Rissbreite von 0.6 mm ($S_D=0.49$) ist deutlich kleiner als die bezogene Dauerschwingfestigkeit S_D des Versuchskörpers mit einer Rissbreite von 0.2 mm ($S_D=0.57$) bzw. 0.4 mm ($S_D=0.53$). Die Intervalle zwischen den einzelnen Stufen sind jedoch gleich groß, weshalb ein linearer

4 Beurteilung des Einflusses der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC

Zusammenhang zwischen der Rissbreite und der Abminderung der bezogenen Oberlast abgeleitet wird. Dieser ergibt sich zu:

$$\text{für } w_{k,I} < 0.6 \text{ mm:} \quad S_{O,wk} = S_{O,I} - 2 \times w_{k,I} \quad (21)$$

mit $S_{O,wk}$ = max. bezogene Oberlast für eine Rissbreite $w_{k,I}$ und eine Lastwechselzahl $N = 2 \times 10^6$

$S_{O,I}$ = max. bezogene Oberlast für eine Rissbreite $w_{k,I} = 0.01$ mm und einer Lastwechselzahl $N = 2 \times 10^6$

$w_{k,I}$ = Rissbreite vor Aufbringen der Ermüdungsbeanspruchung

Ab einer Rissbreite von 0.6 mm ist mit zunehmend größer werdenden Abminderungsfaktoren zu rechnen, da die Vorschädigung bereits in den *Strain-Softening* Bereich reicht.

Kapitel 5

5 Zusammenfassung

5.1 Methodik und Ergebnisse

Das Ziel dieser Diplomarbeit war es, den Einfluss der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung zu untersuchen. Die Versuche wurden an vorgerissenen (*Pre-Cracked*) UHPFRC Versuchskörpern durchgeführt. Die Herstellung der Versuchskörper erfolgte nach zwei Rezepturen, welche im Rahmen einer UHPC-Richtlinienerstellung der Österreichischen Bautechnikvereinigung (ÖBV) entwickelt wurden. Dabei handelt es sich um UHPFRC-Feinkorn-Rezepturen, die einen unterschiedlichen Fasergehalt, eine unterschiedliche Zugtragfähigkeit und ein unterschiedliches Nachbruchverhalten aufweisen. Die Rezepturen sind durch 1.5 Vol.-% und 2.5 Vol.-% gerader Stahl Mikrofasern mit einer Länge von $12.5 \text{ mm} \pm 1.5 \text{ mm}$, sowie einem Durchmesser von $0.175 \text{ mm} \pm 0.015 \text{ mm}$ charakterisiert. Die unterschiedlichen Fasergehalte ergaben sich, um einerseits ein *Strain-Hardening* Verhalten und andererseits ein reines *Strain-Softening* Verhalten zu erhalten.

Der Versuchsaufbau und die Probekörpergeometrie wurden an eine frühere Diplomarbeit [1] angelehnt, welche am Institut bearbeitet wurde und das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung untersuchte. Es handelt sich um ungekerbte Probekörper mit einer Verjüngung in der Mitte, welche bei dynamischer Beanspruchung einen Riss in der Mitte induzieren sollen. Der Versuchsaufbau war so konzipiert, dass die Versuchskörper in der Versuchsvorrichtung möglichst zentrisch belastet wurden. Somit konnten aus Exzentrizitäten entstehende Biegespannungen vermieden werden. Die Probekörper wurden an den Seitenflächen zwischen zwei Hohlprofilen, sowie stirnflächenseitig an einer Stahlplatte mit dem Zwei-Komponenten-Klebstoff auf Epoxidharzbasis (MC-DUR 1280) eingeklebt. Um einen besseren Haftverbund zu ermöglichen, wurden die Probekörper an den Klebestellen sandgestrahlt. Damit eine ausreichend hohe Festigkeit des Klebstoffes gewährleistet wurde, wurde der Epoxidharzkleber für mindestens 24 Stunden ausgehärtet.

Um das Verhalten der beiden UHPFRC-Sorten unter einaxialer statischer Zugkraft zu ermitteln, wurden für beide UHPFRC-Rezepturen jeweils ein statischer Zugversuch durchgeführt. Die ermittelten Zugtragfähigkeiten wurden zusammen mit den ermittelten Zugtragfähigkeiten der Diplomarbeit von Heinzlreiter [1] gemittelt, um eine Referenzzugtragfähigkeit der Probekörper zu erhalten. Bei der Rezeptur mit einem geringeren Fasergehalt (Sorte FM), konnte ein typisches Nachbruchverhalten von UHPFRC unter einaxialer Zugbeanspruchung erkannt werden. Dabei konnte das *Strain-Hardening* Verhalten gefolgt von einem *Strain-Softening* Verhalten identifiziert werden. Die Rezeptur mit einem hohen Fasergehalt (Sorte FH) wies eine höhere Erstrissfestigkeit auf. Aufgrund einer Rissentstehung außerhalb des Messbereiches der Wegaufnehmer für die Rezeptur mit einem hohen Fasergehalt, konnte die Nachrissfestigkeit nicht gemessen werden.

Um das Ermüdungsverhalten von UHPFRC und den Einfluss der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC zu bestimmen, wurden dynamische einaxiale Zugversuche mit einer Lastwechselobergrenze von $N=2 \times 10^6$ an vorgerissenen (*Pre-Cracked*) Versuchskörpern durchgeführt. Zusätzlich wurde für jede UHPFRC-Rezeptur ein Langzeitversuch ($LW=1 \times 10^7$) unter einer definierten Rissbreite von 0.2 mm durchgeführt. Um die Risswachstumsentwicklung in den UHPFRC Versuchskörper unter zyklischer Belastung zu überwachen, wurden die Ermüdungsversuche in drei Belastungsstufen durchgeführt.

In der ersten Stufe wurde jeder Versuchskörper statisch vorbelastet, bis der erste Riss optisch und akustisch, sowie im aufgezeichneten Kraft-Weg-Diagramm festgestellt wurde. Eine Entlastung erfolgte erst dann, wenn im Kraft-Weg Diagramm die Zielverformung (*Pre-Cracking*) erreicht wurde. Die erste statische Vorbelastung bildete eine Risszone, die grundlegend ist, um das Ermüdungsverhalten im Beton besser beurteilen zu können [4]. Das *Pre-Cracking* ersetzte dabei Risse, die z.B. durch Schwindspannungen vor der Inbetriebnahme im Beton entstehen können. In dieser Diplomarbeit wurden Versuchskörper mit einer Rissbreite von 0.2, 0.4, und 0.6 mm untersucht.

In der zweiten Stufe wurden die Versuchskörper dynamisch belastet (kraftgesteuert). Die dynamische Belastung folgte einer Sinuswelle mit einer Frequenz von 10 Hz. Die Oberlast wurde durch einen Prozentsatz der Referenzzugtragfähigkeit gewählt. Die Prozentsätze orientierten sich an den Versuchsserien von Heinzlreiter [1]. Die Unterlast betrug bei jedem dynamischen Versuch 5 kN. Ausgehend von der geplanten Ober- und Unterlast, mit der der Versuchskörper beansprucht wurde, wurde die Mittellage berechnet. Die Mittellage bezeichnet die Last, bis zu der die Entlastung nach dem *Pre-Cracking* erfolgte und von der aus die Versuchskörper weiters dynamisch beansprucht werden.

In der dritten Stufe wurden die Versuchskörper statisch belastet, um die Resttragfähigkeit zu bestimmen. Die Verformungsrate betrug 1mm/m. Dabei wurden nur die Versuchskörper, welche eine maximale Lastwechselzahl von $N=2 \times 10^6$ bzw. $N=1 \times 10^7$ für die Langzeitversuche, ohne zu versagen erreichten, untersucht. Die Versuchskörper, welche die maximalen Lastwechsel, ohne zu versagen erreichten, wurden als Durchläufer (DL) bezeichnet.

Die Lastwechselzahl, der minimale und maximale Weg der auf der Außenseite der Probekörper angeklebten Wegaufnehmer und der minimale und maximale Maschinenweg, wurden während des gesamten Versuches aufgenommen.

Um die Ergebnisse der Ermüdungsversuche einzuordnen, wurden Wöhlerdiagramme ($S-N$ Diagramme) herangezogen, wo die Ergebnisse von Heinzlreiter [1] eingetragen waren. Da die Anzahl der untersuchten Versuchskörper im Rahmen dieser Diplomarbeit gering war, wurden für die Ermittlung der Regressionsgerade der Versuchsreihe mit dem geringeren Fasergehalt, die erhaltene Ermüdungswiderstände von Heinzlreiter [1] mitberücksichtigt. Die Bestimmung der Regressionsgerade erfolgte analog zu jener Methode, welche im Rahmen der Diplomarbeit von Heinzlreiter [1] vorgestellt und verwendet wurden. Bei der Versuchsreihe mit einem hohem Fasergehalt wurden die Regressionsgeraden getrennt anhand der ermittelten Ermüdungswiderstände in den jeweiligen Arbeiten bestimmt. Die Ermüdungswiderstände, die die Rezeptur FM aufwies, waren etwas höher als in der Arbeit von Heinzlreiter [1]. Das Gegenteil wurde bei der Rezeptur FH festgestellt. Bei der Rezeptur FH wurde aus der Analyse des Bruchbildes ein geringer Anteil der Fasern in der Bruchzone festgestellt, welche auf eine ungleichmäßige und ungünstige Orientierung der Fasern zurückzuführen war.

Die Beschreibung des Ermüdungsvorganges selbst erfolgte anhand der „Cycle Creep Curves“, welche eine verformungsbasierte Methode ist, die die Zunahme der Verformungen über die Lastwechsel als Funktion der ertragbaren Lastzyklen darstellt. Da die dynamischen Versuche an vorgerissenen (*Pre-Cracked*) Versuchskörpern durchgeführt wurden, war nur die Phase II und III ersichtlich. Um den Übergang von Phase II in die Phase III in Diagrammen zu bestimmen, wurden die „Cycle Creep Curves“ der einzelnen Versuchskörper analysiert. Die einzelnen Versuchskörper zeigten ca. die gleiche stabile Steigung (Zunahme der Verformungen) in der Phase II des Schädigungsverlaufes auf, wobei ein Unterschied erst in der Phase III zu erkennen war. Bei den Versuchskörpern, welche mit einer Lastwechsel Obergrenze von 10^7 untersucht wurden und nicht versagten sowie bei den Versuchskörpern welche aufgrund von unsachgemäßer Verteilung der Fasern (Rezeptur FH) schlagartig und Vorankündigung versagten, war bei dem Schädigungsverlauf nur die Phase II zu erkennen.

Die Probekörper, welche zufolge der dynamischen Beanspruchung versagten, wurden anhand der Fraktographie analysiert. Durch die visuellen Beobachtungen konnten drei wesentliche Merkmale erkannt werden, die in der Literatur auf die beschriebenen Mechanismen des Schädigungsfortschrittes zurückzuführen waren. *Snubbing* war ein Merkmal, welches durch seine charakteristischen Abplatzungen von kleinen Matrixstücken, pulverisierte Matrix sowie gebogenen Fasern an der Bruchfläche festgestellt werden konnte. Die Bruchflächen, welche eine glatte Oberfläche mit weniger Fasern aufwiesen, wurden dem Ort der Rissinitiierung zugordnet. Hier wurden die Fasern aufgrund von Ermüdung abgerissen und die Zementmatrix infolge von zyklischer Belastung abgeschliffen und abgenutzt. Rostspuren auf der Bruchfläche waren ein Merkmal, welches auf dem in der Literatur beschriebenen Prozess der Tribokorrosion zurückzuführen war und zufolge der Abnutzung der Fasern auftrat.

Der Einfluss der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC wurde anhand der „Cycle Creep Curves“ und Wöhlerdiagrammen beurteilt. Um den Bereich des instabilen

und progressiven Risswachstums (Phase III) unter Ermüdungsbeanspruchung in der statischen Kurve zu bestimmen, wurden die max. Dehnungen im UHPFRC beim Übergang von Phase II in Phase III des Schädigungsverlaufes von UHPFRC berechnet. Zusätzlich wurden die Rissöffnungsraten (dw/dn) berechnet, um den Übergang von Phase II in Phase III des Schädigungsverlaufes zu analysieren. Dazu wurde das Wöhlerdiagramm, sowie die Regressionsgerade der Arbeit von Heinzleiter [1] herangezogen und die Ergebnisse der Ermüdungsversuche für die Rezeptur mit einem hohen Fasergehalt, welche im Rahmen dieser Arbeit erhalten wurden, eingetragen. Durch eine parallele Verschiebung des Regressionsgerade auf die ermittelten Ermüdungswiderstände in Abhängigkeit der Rissbreite erfolgte die Beurteilung.

Die zentrale Erkenntnis, die im Rahmen dieser Untersuchungen gewonnen werden konnte, war, dass der Übergang von Phase II in Phase III des Schädigungsverlaufes von UHPFRC unter Ermüdungsbeanspruchung mit dem *Strain-Softening* Bereich der statischen Kurve übereinstimmt. Bezüglich des Einflusses der Rissbreite auf das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung zeigten die experimentellen Untersuchungen, dass die Erhöhung der Rissbreite eine lineare Reduzierung des Ermüdungswiderstandes von UHPFRC zur Folge hat. Dies ist bis zu einer Rissöffnung, die den Übergang in den *Strain-Softening* Bereich markiert, gültig.

5.2 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnte nur eine eingeschränkte Anzahl an Versuchskörpern untersucht werden, da ein hoher Zeitaufwand mit der Durchführung verbunden ist. Sowohl die durchgeführten experimentellen Untersuchungen als auch die theoretischen Betrachtungen lieferten schlüssige Erkenntnisse über das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung. Um die Datenlage weiter zu verbessern erscheint es erforderlich, weitere gezielte Ermüdungsuntersuchungen an vorgerissenen (*Pre-Cracked*) Versuchskörpern mit unterschiedlichen Rissbreiten (0.1-0.6 mm) durchzuführen. Beispielweise sollten dynamische Versuche an vorgerissenen (*Pre-Cracked*) Versuchskörpern mit unterschiedlichen bezogenen Ober- und Unterspannungen sowie hohen Lastwechselobergrenzen ($N=10^7-10^8$) durchgeführt werden. Aus diesem Grund besteht nach wie vor Bedarf an Forschung auf dem Gebiet der Ermüdung von UHPFRC und besonders in Bezug auf den Einfluss der Rissbreite.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Heinkelreiter. „Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Ultrahochleistungsfaserbetonen unter Zugschwellbeanspruchung“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, (2020).
- [2] T. Makita und E. Brühwiler. "Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)". In: *Materials and Structures* 47 (3) (2014), S. 475-491.
- [3] F. Germano, G. Tiberti und G. Plizzari. "Post-peak fatigue performance of steel fiber reinforced concrete under flexure". In: *Materials and Structures* 49 (10) (2016), S. 4229-4245.
- [4] D. M. Carlesso, A. De la Fuente und S. H. P. Cavalaro. "Fatigue of cracked high performance fiber reinforced concrete subjected to bending". In: *Construction and Building Materials*, 220 (2019), S. 444-455.
- [5] KrampeHarex Fibrin Gesellschaft mbH. *Datenblatt DM 12,5/0,175*. URL: https://www.krampeharex.com/typo3temp/pdf/PDB_KrampeHarex-Drahtfaser-DM_12_5_0_175.pdf?1592382091 (Zugriff am 19. 07. 2021).
- [6] D. M. Carlesso. „Flexural fatigue of pre-cracked fibre reinforced concrete: experimental study and numerical modelling“. Dissertation. Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona Tech, (2019).
- [7] G. Chanvillard, P. Pimienta, A. Pineaud und P. Rivillon. "FATIGUE FLEXURAL BEHAVIOUR OF PRE-CRACKED SPECIMENS OF DUCTAL® UHPFRC". In: *Proceedings of the 6th RILEM International Symposium in Fiber Reinforced Concrete (BEFIB)*, Italy (2004), S. 1-16.
- [8] B. Fitik. „Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich“. Dissertation. Technische Universität München, 2012.
- [9] C. Kessler-Kramer. „Zugtragverhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung“. Dissertation. Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 2002.

- [10] Material Magazin. URL: <https://www.materialmagazin.com/index.php/labor/fraktographie> (Zugriff am 04.08.2021)
- [11] E. Brühwiler und E. Denarié. „Stahl-UHFB – Stahlbeton Verbundbauweise zur Verstärkung von bestehenden Stahlbetonbauteilen mit Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB). In: *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (4) (2013), S. 216-226.
- [12] BFT International. *UHPFRC-Verbundfugen*. URL: https://www.bft-international.com/de/artikel/bft_UHPFRC-Verbundfugen_3118788.html/ (Zugriff am 04.10.2021)
- [13] P. Fehlmann. „Zur Ermüdung von Stahlbetonbrücken“. Dissertation. ETH Zürich, (2012)
- [14] L. Lohaus, N. Oneschkow und M. Werfer. „Design Model for the fatigue behaviour of normal-strength, high-strength and ultra-high-strength concrete“. In: *Structural Concrete* 13 (3) (2012), S. 182-192.
- [15] *SIA 2052:2016-06-01: Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) – Baustoffe, Bemessung und Ausführung*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, März 2016.
- [16] *Bétons fibrés à ultra-hautes performances – Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes*. AFGC Association Française de Génie Civil, Setra Service d'études techniques des routes et autoroutes, Jan. 2002.
- [17] *ÖNORM EN 1992-1-1:2011 12 01: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung)*. Wien: Austrian Standards, Dez. 2011.
- [18] D. C. Gonzáles, R. Moradillo, J. Mínguez, J. A. Martínez und M. A. Vicente. „Postcracking residual strength of fiber-reinforced high-performance concrete after cyclic loading“. In: *fib*. International Federation for Structural Concrete 19 (2) (2018), S. 340-351.
- [19] J. Jungwirth. „Zum Tragverhalten von Zugbeanspruchten Bauteilen aus Ultra-Hochleistungs-Faserbeton“. Dissertation. EPFL, (2006).
- [20] M. K. Lee und B. I. G. Barr. „An Overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete“. In: *Cement & Concrete Composites* 26 (2004), S. 299-305.
- [21] P. Heek und P. Mark. „Zur Ermüdung von Beton und Stahlfaserbeton: Wöhlerlinien unter Berücksichtigung spannungs- und materialabhängiger Duktilität“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (4) (2016), S. 221-232.
- [22] M. Thiele. „Experimentelle Untersuchung und Analyse der Schädigungsevolution in Beton unter hochzyklischen Ermüdungsbeanspruchungen“. Dissertation. Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung (BAM), (2016).
- [23] A. E. Naaman und H. W. Reinhard. „High Performance Reinforced Cement Composites 2 (HPRFCC 2). In: *Proc. 2nd Int. RILEM Workshop*, (1996).

- [24] G. A. Plizzari, S. Cangiano und S. Alleruzzo. „The Fatigue Behaviour of cracked Concrete“. In: *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures Ltd* 20 (8) (1997), S. 1195-1206.
- [25] S. Cangiano, G.A. Plizzari und V. Slowik. „Experimental Investigation into the Fatigue Crack Growth in Concrete“. In: *Fracture Mechanic of Concrete Structures Proceedings FRAMCOS-3* (1998), S.645-654.
- [26] *fib Model Code for Concrete Structures 2010* (Final draft), CEB-Comité Euro-international du Béton, März 2012.
- [27] V. Slowik, G. Plizzari und V. Saouma. „Fracture of Concrete under Variable Amplitude Fatigue Loading“. In: *ACI Materials Journal* 93 (3) (1996), S. 272-283.
- [28] D. A. Hordijk. „Local approach to fatigue of concrete“. Dissertation. Delft University of Technology, (1991).
- [29] C. von der Haar, J. Hümme, S. Marx und L. Lohaus. „Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten eines höherfesten Normalbetons“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (10) (2015), S. 699-709.
- [30] J. O. Holmen. „Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading“. Dissertation. Universität Trondheim (1979).
- [31] N. Oneschkow. „Analyse des Ermüdungsverhaltens von Beton anhand der Dehnungsentwicklung“. Dissertation. Leibniz Universität Hannover, (2014).
- [32] K. -H. Rings. „Unbewehrter und bewehrter Beton unter häufiger wiederholter Wechselbeanspruchung“. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt, (1986).
- [33] B. S. Li VC. „Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix“. In: *Composites* 21(2) (1990), S. 132-140.

Anhang A

Mischprotokolle der UHPFRC-Rezepturen

A.1 Betoniercharge FM-Rezeptur

Gesamtvolumen: 30 l

Betonier-Datum: 14.4.2021

Ausgangsstoffe	Massen [kg]
Lafrage Contragress – CEM I 52.5 N	22.5
BASF Microsilika	2.7
Quarzmehl Dorsilit 16900	9
Quarzsand Geba 0.1 - 0.2 mm	5.81
Quarzsand Dorsilit Nr.8 0.3 - 0.8 mm	23.26
Wasser	5.6
Fließmittel - BT3 Premment H500	0.675
Stahlfasern – DM12.5/0.175	3.53

Mischablauf

Zugabestoffe	Mischdauer
Zement, Mikrosilika und Quarzmehl trockenmischen	3 min
Zugabe Wasser und Fließmittel – Mischen bis zur Dispergierung	30 sec bis mehrere min.
Zugabe Quarzsand	3 min
Vereinzelte Zugabe Stahlfasern	2 min
Gesamte Mischdauer	ca. 8-10 min
Setzfließmaß	260 mm

A.2 Betoniercharge FH-Rezeptur

Gesamtvolumen: 30 l

Betonier-Datum: 21.4.2021

Ausgangsstoffe	Massen [kg]
Lafrage Contragress – CEM I 52.5 N	22.5
BASF Microsilika	2.7
Quarzmehl Dorsilit 16900	9
Quarzsand Geba 0.1 - 0.2 mm	5.643
Quarzsand Dorsilit Nr.8 0.3 - 0.8 mm	22.575
Wasser	5.541
Fließmittel - BT3 Premment H500	0.765
Stahlfasern – DM12.5/0.175	5.889

Mischablauf

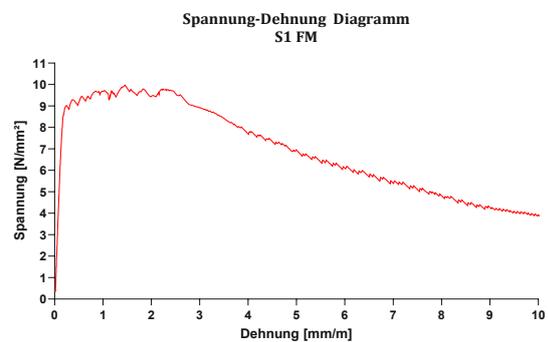
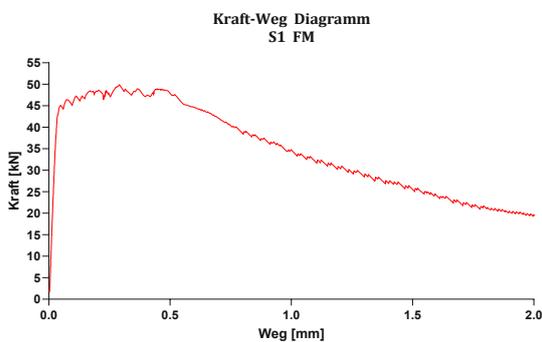
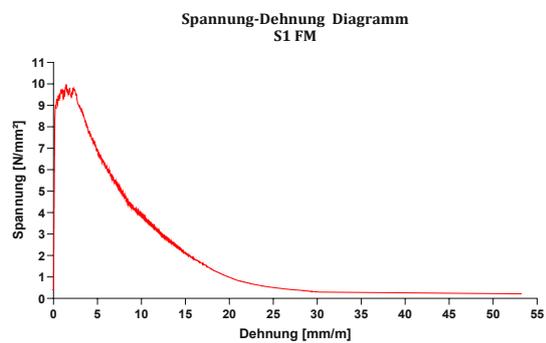
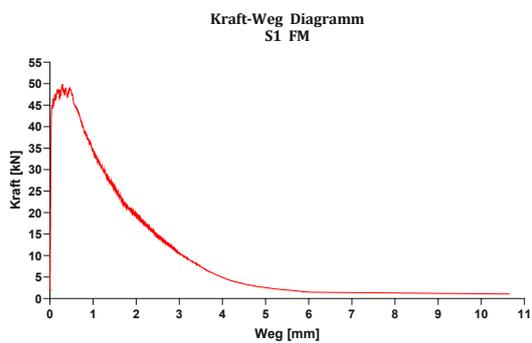
Zugabestoffe	Mischdauer
Zement, Mikrosilika und Quarzmehl trockenmischen	3 min
Zugabe Wasser und Fließmittel – Mischen bis zur Dispergierung	30 sec bis mehrere min.
Zugabe Quarzsand	3 min
Vereinzelte Zugabe Stahlfasern	2 min
Gesamte Mischdauer	ca. 8-10 min
Setzfließmaß	270 mm

Anhang B

Protokolle der dynamischen und statischen Versuche

B.1 Versuch S1 FM

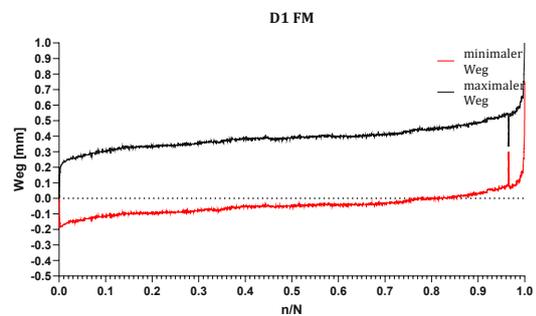
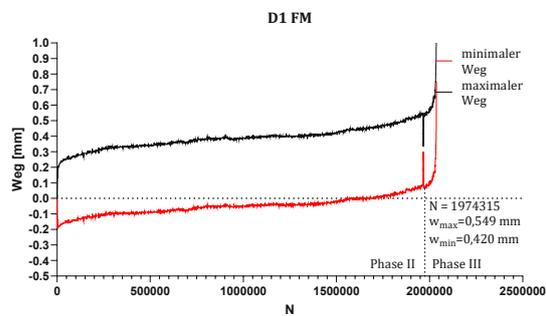
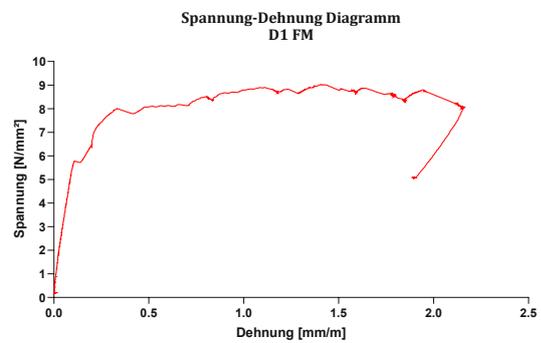
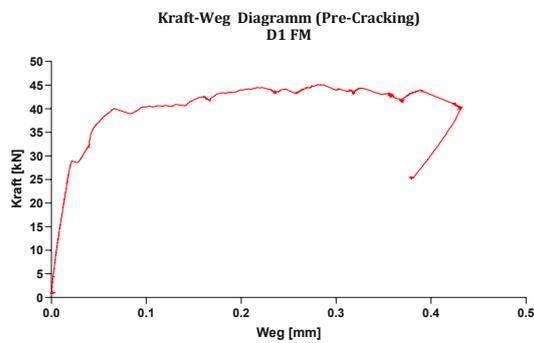
Startdatum des Versuchs	Erstrissfestigkeit [kN]	Nachrissfestigkeit [kN]
02.06.2021	45.07	49.89





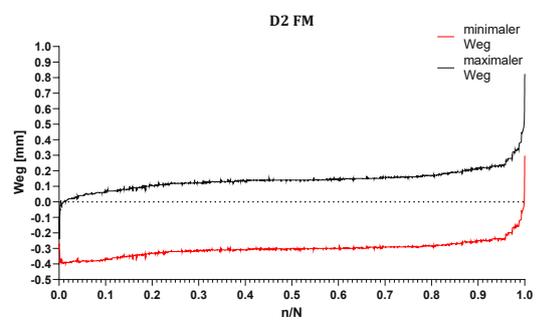
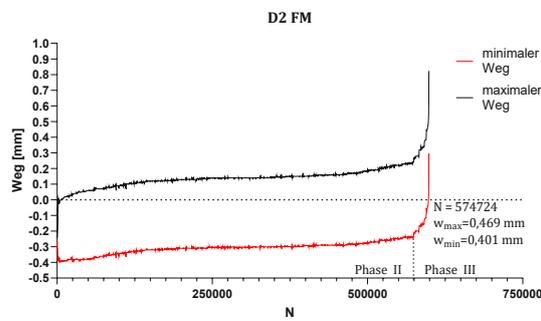
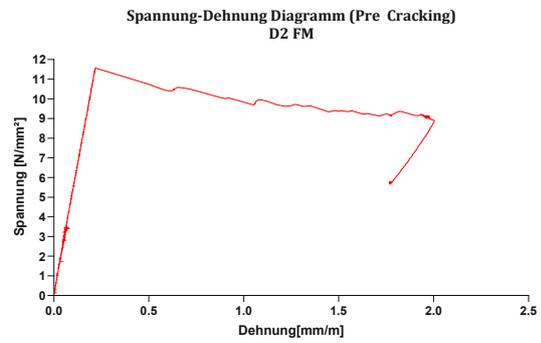
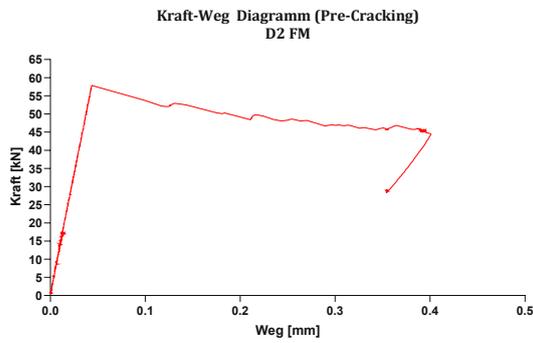
B.2 Versuch D1 FM 55.26 PC 0.4

Startdatum des Versuchs	P_{max} Zugtragfähigkeit [kN]	Pre - Cracking [mm]	S [-]	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Ertragene Lastwechsel
03.06.2021	45.10	0.4	0.55	27.2	5	DL(2036652)



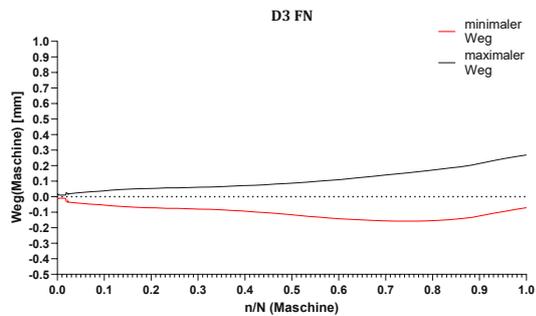
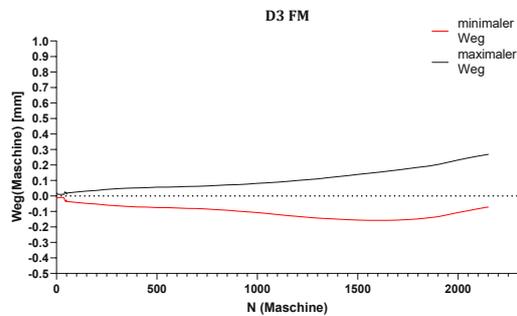
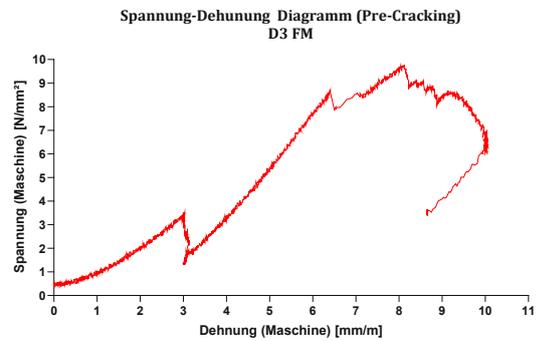
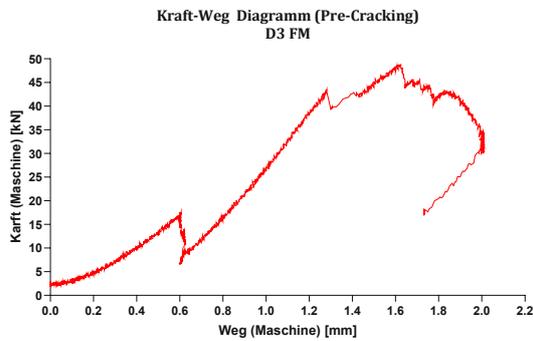
B.3 Versuch D2 FM 58.71 PC 0.4

Startdatum des Versuchs	P_{max} Zugtragfähigkeit [kN]	Pre - Cracking [mm]	S [-]	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Ertragene Lastwechsel
23.06.2021	57.82	0.4	0.58	28.9	5	598901



B.4 Versuch D3 FM 55.26 PC 1.2

Startdatum des Versuchs	P_{max} Zugtragfähigkeit [kN]	Pre - Cracking [mm]	S [-]	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Ertragene Lastwechsel
24.06.2021	48.67	1.2	0.55	27.2	5	2151

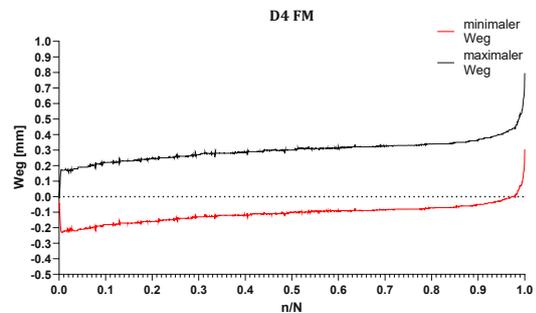
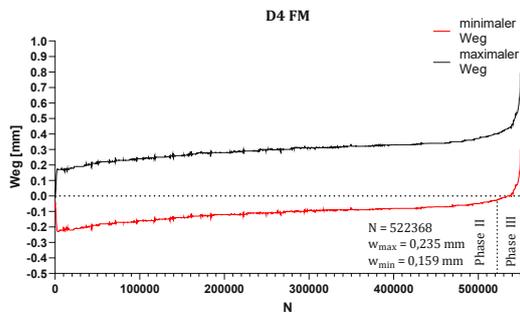
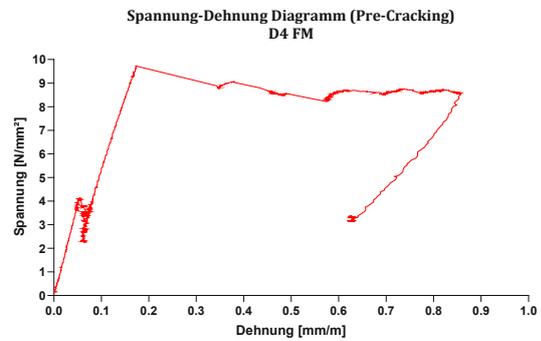
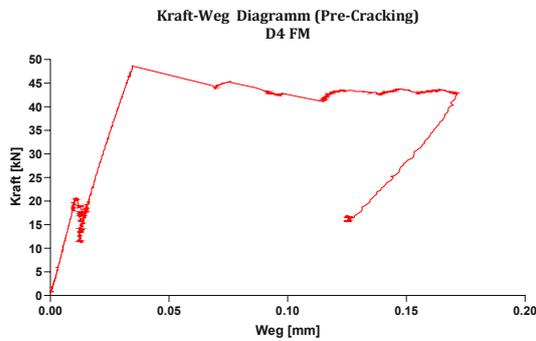


Anmerkungen:

- Riss unterhalb des Wegsensors
- Die Diagramme beziehen sich auf die Wegsensoren der Maschine

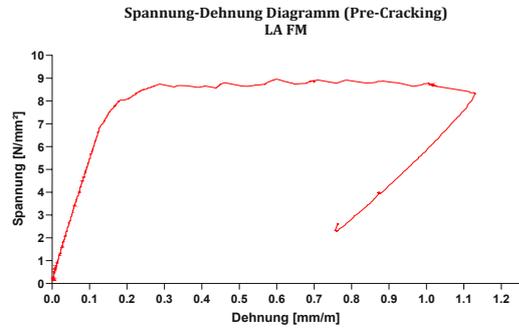
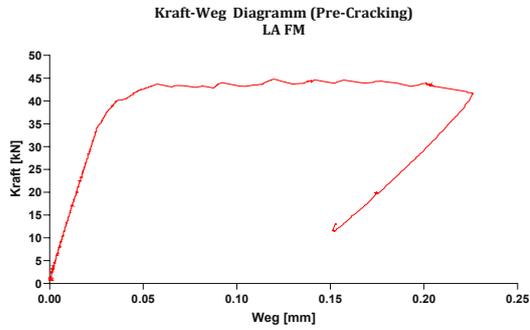
B.5 Versuch D4 FM 58.71 PC 0.2

Startdatum des Versuchs	P_{max} Zugtragfähigkeit [kN]	Pre - Cracking [mm]	S [-]	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Ertragene Lastwechsel
06.07.2021	48.63	0.2	0.58	28.9	5	549851

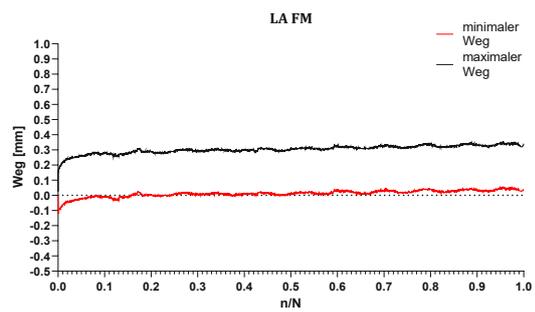
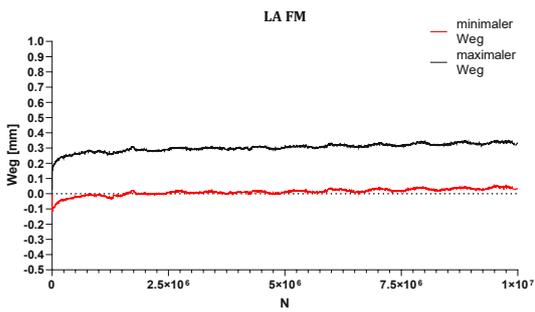
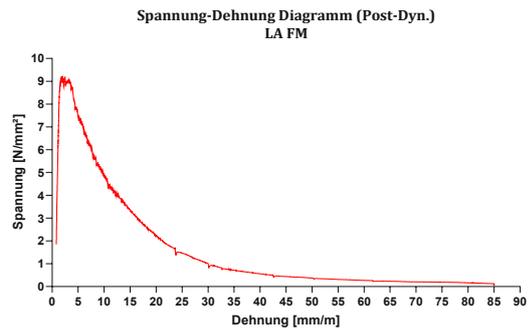
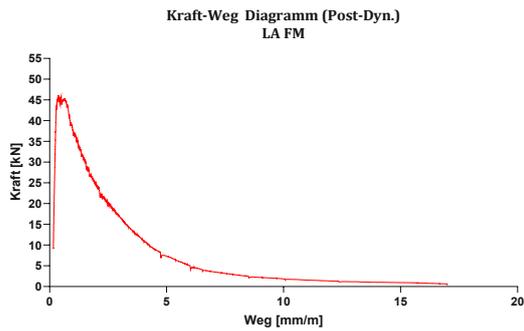


B.6 Versuch LA FM 43.68 PC 0.2

Startdatum des Versuchs	P_{max} Zugtragfähigkeit [kN]	Pre - Cracking [mm]	S [-]	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Ertragene Lastwechsel
09.06.2021	44.77	0.2	0.43	21.5	5	9997451

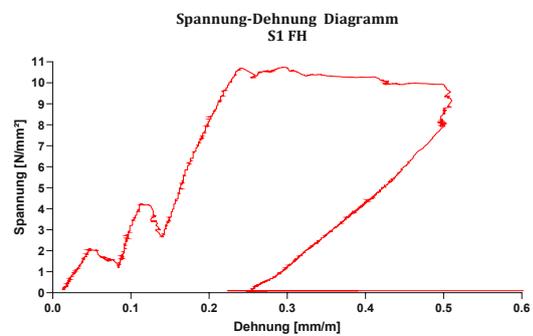
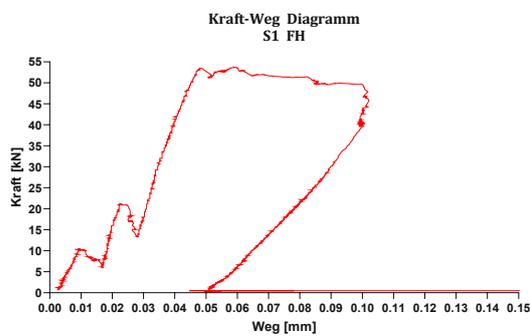
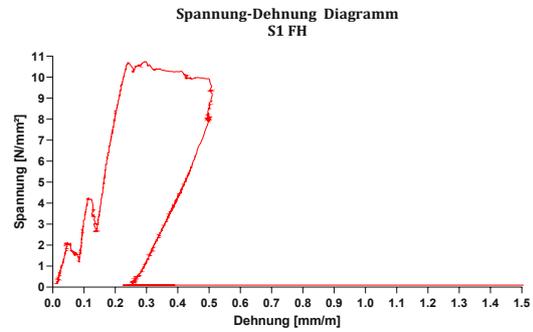
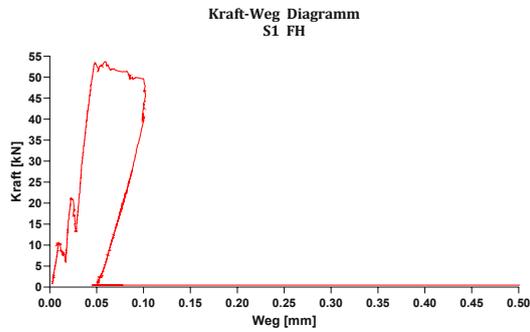


Startdatum des Versuchs	P_{Rest} Resttragfähigkeit [kN]
10.06.2021	46.08



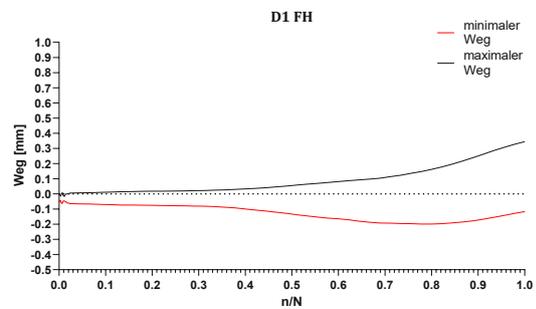
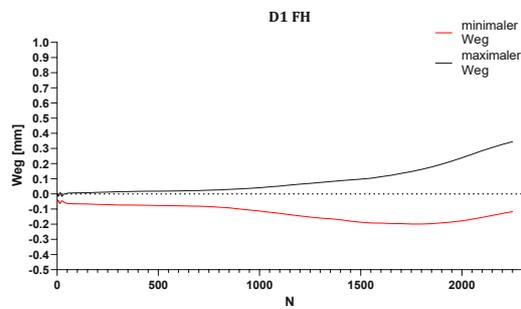
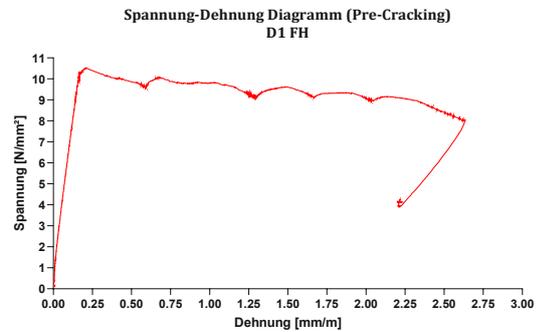
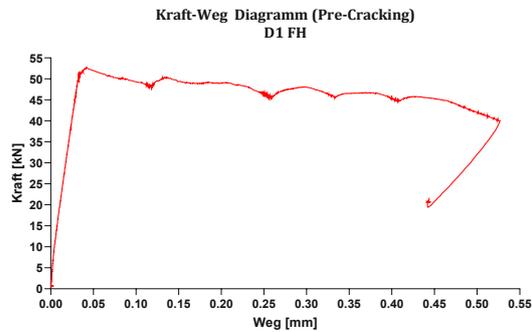
B.7 Versuch S1 FH

Startdatum des Versuchs	Erstrissfestigkeit [kN]	Nachrissfestigkeit [kN]
28.06.2021	10.53	53.71



B.8 Versuch D1 FH 67.47 PC 0.6

Startdatum des Versuchs	P_{max} Zugtragfähigkeit [kN]	Pre - Cracking [mm]	S [-]	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Ertragene Lastwechsel
05.07.2021	52.61	0.6	0.67	36.8	5	2251

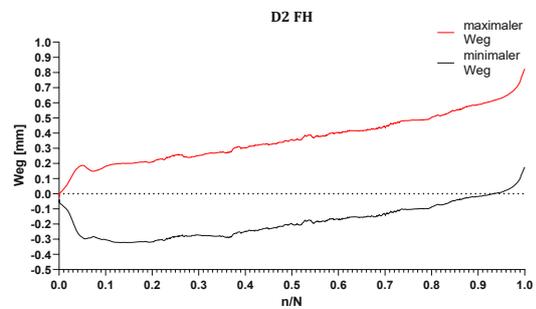
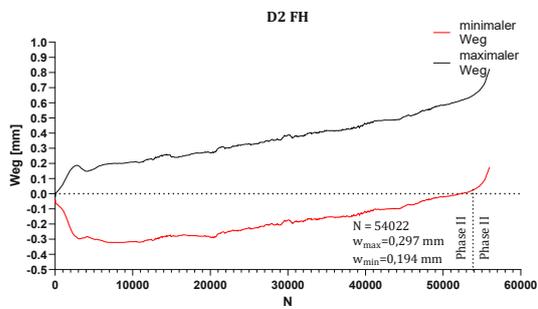
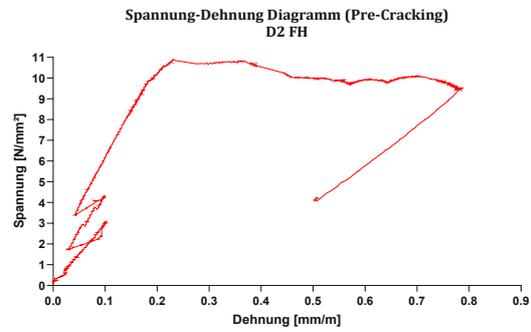
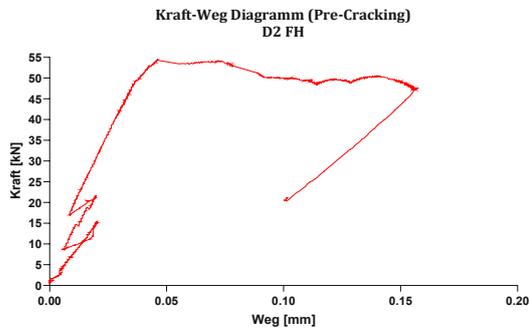


Anmerkungen:

- Aufgrund der geringen Anteile an Fasern, ist der Versuchskörper nach 2251 Lastwechseln zerbrochen

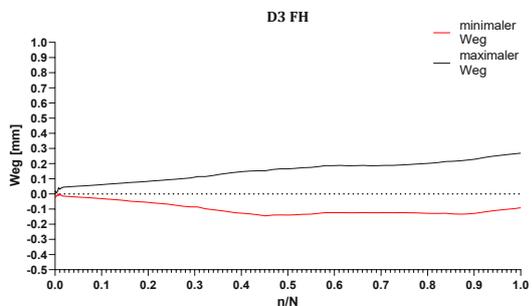
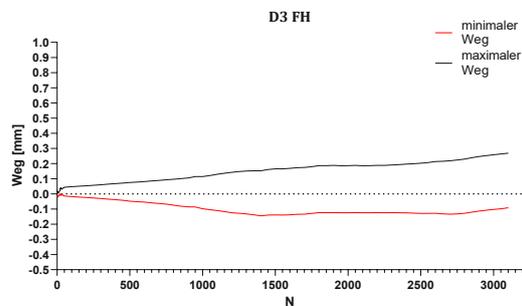
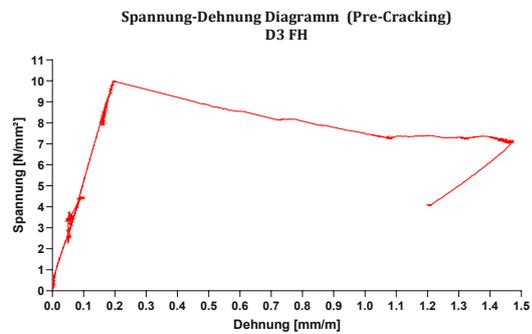
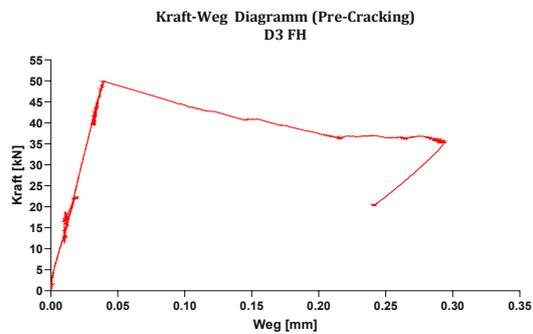
B.9 Versuch D2 FH 67.47 PC 0.2

Startdatum des Versuchs	P_{max} Zugtragfähigkeit [kN]	Pre - Cracking [mm]	S [-]	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Ertragene Lastwechsel
07.07.2021	54.49	0.2	0.67	36.8	5	56001



B.10 Versuch D3 FH 67.47 PC 0.3

Startdatum des Versuchs	P_{max} Zugtragfähigkeit [kN]	Pre - Cracking [mm]	S [-]	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Ertragene Lastwechsel
12.07.2021	49.95	0.3	0.67	36.8	5	3101

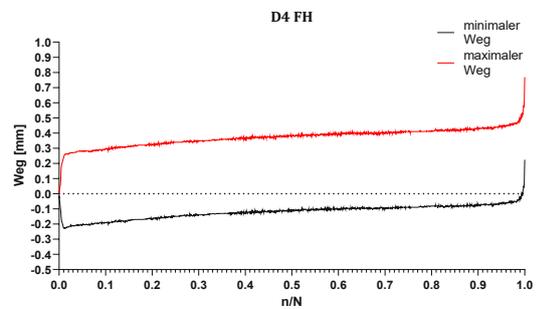
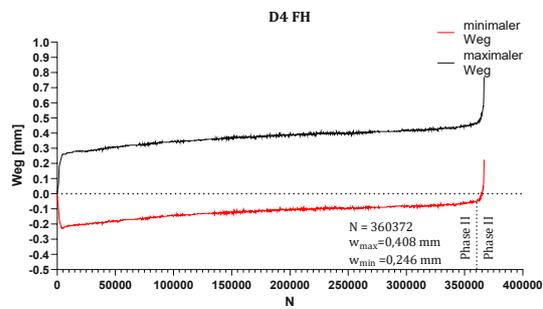
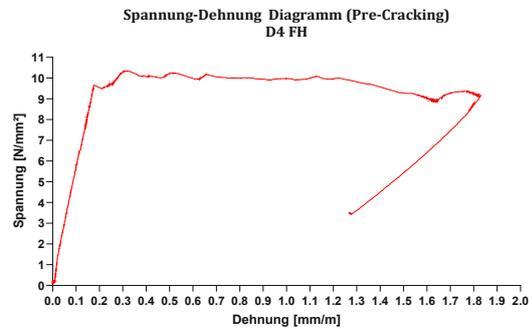
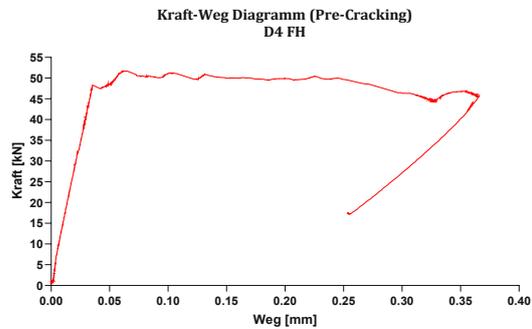


Anmerkungen:

- Aufgrund der geringen Anteile an Fasern, ist der Versuchskörper nach 3101 Lastwechseln zerbrochen

B.11 Versuch D4 FH 56.52 PC 0.4

Startdatum des Versuchs	P_{max} Zugtragfähigkeit [kN]	Pre - Cracking [mm]	S [-]	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Ertragene Lastwechsel
17.07.2021	51.70	0.4	0.56	30.83	5	366801



B.12 Versuch LA FH 56.52 PC 0.2

Startdatum des Versuchs	P_{max} Zugtragfähigkeit [kN]	Pre - Cracking [mm]	S [-]	Oberlast [kN]	Unterlast [kN]	Ertragene Lastwechsel
13.07.2021	52.57	0.2	0.56	30.83	5	2158051

