

Betonermüdung unter verschiedenen Belastungsfrequenzen und –pausen

Sebastian Schneider¹ und Steffen Marx¹

¹*Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover, Deutschland*

KURZFASSUNG:

Der Ermüdungswiderstand von druckschwellbeanspruchtem Beton wird üblicherweise versuchstechnisch an zylindrischen Probekörpern mit Belastungsfrequenzen zwischen 1 Hz und 10 Hz ermittelt. Allerdings ist dieser von der Belastungsfrequenz abhängig. So führt eine Erhöhung der Belastungsfrequenz zu einer Erhöhung der Spannungsgeschwindigkeit sowie zu einer stärkeren Probekörpererwärmung. Anhand von Ermüdungsversuchen mit Belastungsfrequenzen von 2 Hz, 4 Hz und 7 Hz sowie pausierten Ermüdungsversuchen mit 4 Hz und 7 Hz konnte gezeigt werden, dass sich unter gleichen Probekörpertemperaturen der Belastungsfrequenzeinfluss auf die Druckfestigkeitserhöhung infolge erhöhter Spannungsgeschwindigkeiten zurückführen lässt. Bei kontinuierlichen Ermüdungsversuchen führen insbesondere auf den niedrigen Oberspannungsniveaus höhere Belastungsfrequenzen zu höheren Probekörpertemperaturen, die sich wiederum negativ auf den Ermüdungswiderstand auswirken.

Keywords: Ermüdung, Belastungsfrequenz, Belastungspausen, Hochfester Beton, Temperatur

ABSTRACT:

The fatigue resistance of concrete is usually determined experimentally on cylindrical specimens with loading frequencies between 1 Hz and 10 Hz. However, the fatigue resistance depends on the loading frequency. An increase in the loading frequency leads to an increase in the stress rate and to a stronger warming of the specimen. Based on fatigue tests with loading frequencies of 2 Hz, 4 Hz and 7 Hz as well as 4 Hz and 7 Hz fatigue tests with rest periods it could be shown that under the same specimen temperatures the loading frequency influence can be explained with the increase in compressive strength as a result of increased loading rates. In continuous fatigue tests, higher loading frequencies lead especially at low stress levels to higher specimen temperatures, which have a negative effect on the fatigue resistance.

Keywords: fatigue, loading frequency, rest periods, high strength concrete, temperature

1 EINLEITUNG

Für die sichere Bemessung von ermüdungsbeanspruchten Betontragwerken wie z. B. Straßen- und Eisenbahnbrücken, Tragstrukturen für On- und Offshore Windenergieanlagen, Maschinenfundamenten und Kranbahnen ist ein ausreichendes Verständnis über das Ermüdungsverhalten bzw. über den Ermüdungswiderstand von Beton notwendig. Anfang des 20. Jahrhunderts wurde national und international damit begonnen das Ermüdungsverhalten von Beton zu erforschen. Diesbezüglich geben Marx et al. (2017) und Oneschkow et al. (2018) einen umfangreichen und ausführlichen Überblick über die Vielzahl an dokumentierten Untersuchungen. Dabei hat sich gezeigt, dass sich das Ermüdungsverhalten als äußerst komplex darstellt. Um das Materialverhalten im für Beton anwendungstypischen Druckschwellbereich zu untersuchen, wurden und werden vorwiegend zylindrische Betonprobekörper in Laboruntersuchungen zyklisch belastet bis entweder ein Ermüdungsversagen eintritt oder eine vorher definierte Grenzlastwechselzahl erreicht wird. Um solche Versuche in einer vertretbaren Zeitdauer durchführen zu können, müssen sowohl die Beanspruchungsniveaus als auch die Belastungsfrequenzen gegenüber denen in realen Bauwerken erhöht werden. Allerdings zeigt das Ermüdungsverhalten von Beton eine Abhängigkeit von der Belastungsfrequenz. Noch vor kurzem wurde davon ausgegangen, dass höhere Belastungsfrequenzen zu höheren Bruchlastwechselzahlen führen (Sparks & Menzies 1973, Holmen 1979, van Leuween & Siemes 1979, Siemes 1982, Petkovic et al. 1992, Kim & Kim 1996). Neuere Untersuchungen an hochfesten Betonen deuten allerdings darauf hin, dass auf geringeren Oberspannungsniveaus höhere Belastungsfrequenzen zu geringeren Bruchlastwechselzahlen führen (Oneschkow 2014, von der Haar et al. 2015, Elsmeier 2019). Aufgrund dieses Materialverhaltens sind Versuchsergebnisse welche mit unterschiedlichen Belastungsfrequenzen ermittelt wurden nicht uneingeschränkt miteinander vergleichbar. Darüber hinaus ist zu vermuten, dass insbesondere auf den bemessungsrelevanten Oberspannungsniveaus von $S_{\max} < 0,75$ höhere Belastungsfrequenzen zu konservativen Bruchlastwechselzahlen führen. Um den Very-High-Cycle Fatigue Bereich ($N > 10^7$) zu untersuchen, sind allerdings hohe Belastungsfrequenzen unverzichtbar um entsprechende Versuche in einer akzeptablen Versuchsdauer zu absolvieren. Bislang existiert allerdings noch kein ganzheitliches Materialmodell, welches diesen wechselnden Einfluss der Belastungsfrequenz auf den Ermüdungswiderstand von Beton beschreibt.

2 EINFLUSS DER BELASTUNGSFREQUENZ AUF DEN ERMÜDUNGSWIDERSTAND VON BETON

2.1 Einfluss der Belastungsfrequenz auf die Bruchlastwechselzahlen von Beton

Sparks & Menzies (1973) wiesen schon 1973 darauf hin, dass das Ermüdungsverhalten von Beton von der Belastungsgeschwindigkeit beeinflusst wird. Um dies versuchstechnisch zu beweisen, führten sie Ermüdungsversuche an Normalbeton mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen und Leichtbeton durch. Die zwei Betone mit einer Gesteinskörnung aus Kalkstein bzw. Flusskies wiesen eine 28-Tage Würfeldruckfestigkeit von etwa 30 MPa und der Leichtbeton von 20 MPa auf. Als Probekörper wurden Prismen ($a/b/h = 102/102/203$ mm) verwendet. Die Ermüdungsbelastung besaß eine dreieckförmige Belastungsfunktion mit einer stets konstanten Spannungsgeschwindigkeit von 0,5 MPa/s bzw. 50 MPa/s. Die Ergebnisse in Bild 1 und Bild 2 zeigen, dass eine Erhöhung der Spannungsgeschwindigkeit um zwei Zehnerpotenzen zu einer Erhöhung der mittleren Bruchlastwechselzahlen um eine bis zwei Zehnerpotenzen führte. Aufgrund dieser Erkenntnisse warnten Sparks & Menzies vor einer

Überschätzung des Ermüdungswiderstandes aus Laboruntersuchungen in Bezug auf reale Beanspruchungssituationen.

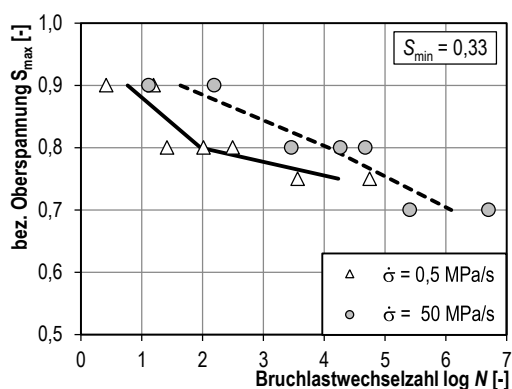


Bild 1: Bruchlastwechselzahlen von Normalbeton mit Flusskies unter unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten (Sparks & Menzies 1973)

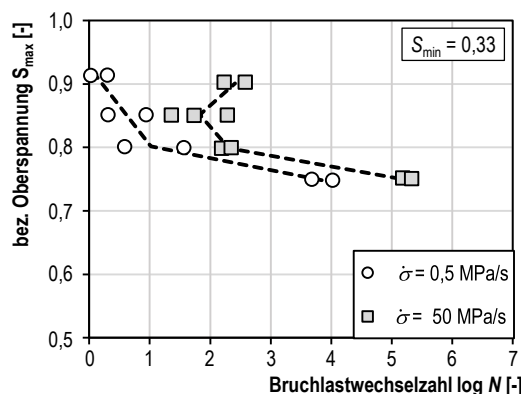


Bild 2: Bruchlastwechselzahlen von Normalbeton mit Kalkstein unter unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten (Sparks & Menzies 1973)

Im Jahre 1979 veröffentlichte Holmen (1979) die Ergebnisse von einstufigen Ermüdungsversuchen an zylindrischen Probekörpern ($d/h = 100/250$ mm) mit einer mittleren Würfeldruckfestigkeit von 39,6 MPa. Die konstant aufgebrachten bezogenen Unterspannungen betragen $S_{min} = 0,05$. Auf hohen bezogenen Oberspannungen von $S_{max} = 0,75, 0,825$ und $0,90$ wurden Versuche mit Belastungsfrequenzen von 1 Hz und 5 Hz bzw. 5 Hz und 10 Hz durchgeführt, siehe Bild 3. Die aus den Einzelergebnissen bestimmten Mittelwerte zeigen, dass eine Erhöhung der Belastungsfrequenz zu höheren Bruchlastwechselzahl führte. Holmen erklärt diese Beobachtung mit der zeitabhängigen Schädigungszunahme infolge Belastungen oberhalb der kritischen Spannung. Allerdings zeigen die ungleichmäßigen Abstände der mittleren Bruchlastwechselzahlen, dass der Frequenzeinfluss nicht allein mit einer konstant zur Verfügung stehenden Versuchsdauer erklärt werden kann, sondern noch weitere Effekte wirken müssen.

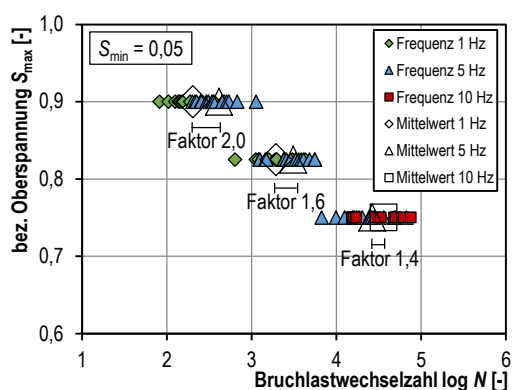


Bild 3: Bruchlastwechselzahlen von Normalbeton unter unterschiedlichen Belastungsfrequenzen (Holmen 1979)

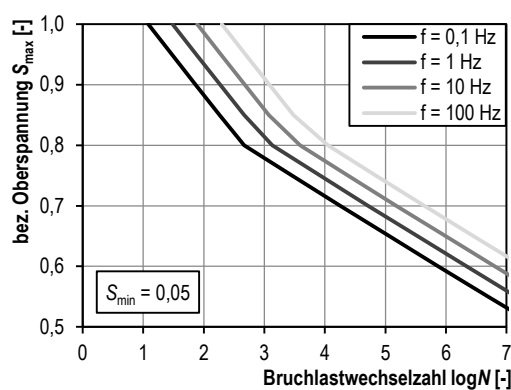


Bild 4: Wöhlerlinien für druckschwellbeanspruchten Beton und unterschiedlichen Belastungsfrequenzen (Hsu 1981)

Hsu (1981) beschrieb in seinen theoretischen Studien, dass der Ermüdungswiderstand von Beton neben dem Beanspruchungsniveau auch von der Dauer der Beanspruchung oberhalb der kritischen Spannung sowie von der Beanspruchungsgeschwindigkeit abhängen muss. Eine Beanspruchung

oberhalb der kritischen Spannung, welche durch Hsu mit $0,75 \cdot f_c$ festgelegt und der Dauerstandsfestigkeit gleichgesetzt wurde, führe zu einer Minderung der Betondruckfestigkeit und ist in die Bestimmung der bezogenen Beanspruchungen einzubeziehen. Gleiches gilt laut Hsu für den festigkeitssteigernden Einfluss von hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten. Aus diesem Grund erweiterte Hsu die Wöhlerlinien aus (Tepfers & Kutti 1979) um einen Term, der die Dauer eines Lastwechsels berücksichtigt. In diesen fließen die oben genannten Effekte ein. Da die beschriebenen Effekte abhängig vom Beanspruchungsniveau sind, wurde eine unterschiedliche Beschreibung für den High-Cycle Fatigue und den Low-Cycle Fatigue Bereich entwickelt. In Bild 4 sind die ausgewerteten Wöhlerlinien für ein Unterspannungsniveau von $S_{\min} = 0,05$ und für verschiedene Belastungsfrequenzen dargestellt. Der Frequenzeinfluss im Low-Cycle Fatigue Bereich konnte mit den Wöhlerlinien im Vergleich zu Versuchsergebnissen aus der Literatur gut abgebildet werden. Für den High-Cycle Fatigue Bereich, in dem die Belastungsfrequenz nach Hsu einen deutlich geringeren Einfluss auf die Bruchlastwechselzahlen besitzt, gelang der Vergleich aufgrund der geringen Versuchsergebnisse und der hohen Streuung nur sehr bedingt. So bleibt die Gültigkeit dieser Annahme für den High-Cycle Fatigue Bereich unklar.

Hohberg (2004) berichtete erstmal von einer Umkehr des Frequenzeinflusses in Abhängigkeit von der bezogenen Oberspannung. Auf Grundlage von Ermüdungsversuchen an Betonen der Festigkeitsklasse B25, B45 und B95 schlussfolgerte er, dass bei Oberspannungen die oberhalb der kritischen Spannung liegen höhere Belastungsfrequenzen zu höheren Bruchlastwechselzahlen führen. Bei Oberspannungen die unterhalb der kritischen Spannung lagen, welche laut Hohberg für die untersuchten trocken gelagerten Betone $\sigma_{\text{krit}} = 0,75 \cdot f_c$ betrug, führen höhere Belastungsfrequenzen zu geringeren Bruchlastwechselzahlen. Die Ursache für diese Beobachtung fand Hohberg allerdings nicht.

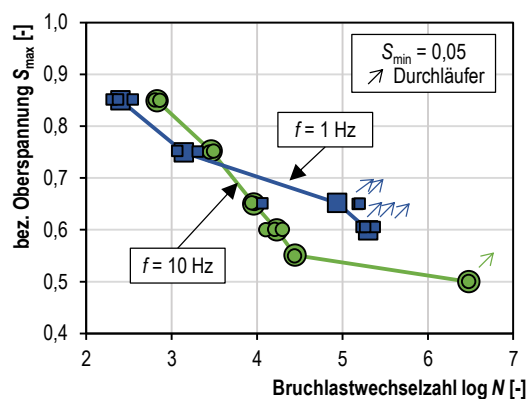


Bild 5: Bruchlastwechselzahlen von hochfestem Vergussbeton unter unterschiedlichen Belastungsfrequenzen (Elsmeier 2015)

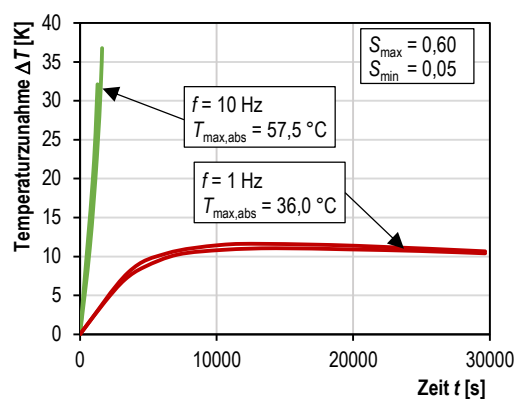


Bild 6: Temperaturzunahme eines hochfesten Vergussbetons auf $S_{\min}/S_{\max} = 0,05/0,60$ unter 1 Hz und 10 Hz (Elsmeier 2015)

Elsmeier (2015) berichtet von Ermüdungsuntersuchungen an einem hochfesten Vergussbeton mit Belastungsfrequenzen von 1 Hz und 10 Hz. Elsmeier stellte fest, dass sich der Frequenzeinfluss für Oberspannungsniveaus $S_{\max} < 0,75$ und $S_{\min} = 0,05$ umkehrt, siehe Bild 5. Sie bestätigt damit die Beobachtungen von Hohberg (2004). Anhand von Temperaturmessungen an den Probekörpern konnte festgestellt werden, dass die 1 Hz Versuche auf dem Beanspruchungsniveau $S_{\min}/S_{\max} = 0,05/0,60$ einen stationären Temperaturzustand mit einer Zunahme von etwa 11 K erreichten, wohingegen sich die 10 Hz Versuche kontinuierlich bis über 30 K erwärmten, siehe Bild 6. Daraus wurde von Elsmeier

geschlussfolgert, dass sich hohe Probekörpertemperaturen infolge hoher Belastungsfrequenzen und langen Versuchszeiten negativ auf den Ermüdungswiderstand von Beton auswirken.

Ähnliche Beobachtungen machten von der Haar et al. (2015) auch für einen höherfesten Normalbeton der Festigkeitsklasse C 70, siehe Bild 7. Der Mittelwert der Bruchlastwechselzahlen der 10 Hz-Versuche ist auf dem Oberspannungsniveau von $S_{max} = 0,80$ etwas größer als der Mittelwert der Bruchlastwechselzahlen der 1 Hz-Versuche. Dies kehrt sich auf dem Oberspannungsniveau von $S_{max} = 0,70$ jedoch um. Auf dem Oberspannungsniveau $S_{max} = 0,60$ ist zu beachten, dass die Versuche mit einer Belastungsfrequenz von 1 Hz aus Gründen der Versuchsdauer bei $\log N = 5,5$ abgebrochen und als Durchläufer gezählt wurden, sodass sich der Frequenzeinfluss auf diesem Spannungsniveau nicht herausstellen ließ. Jedoch wurde nach von der Haar et al. für die Proben der 1 Hz-Versuche kein Anzeichen für ein nahes Versagen erkannt, sodass eine deutlich höhere Bruchlastwechselzahl als $\log N = 5,5$ zu vermuten ist. Die gemessenen Oberflächentemperaturen sind in Bild 8 dargestellt. Je geringer das Oberspannungsniveau, desto höher ist der belastungsfrequenzbedingte Temperaturunterschied.

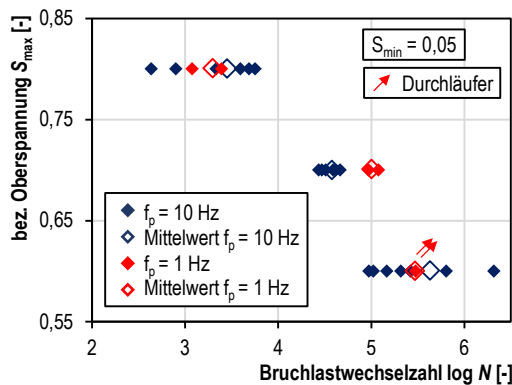


Bild 7: Bruchlastwechselzahlen eines höherfesten Normalbetons unter unterschiedlichen Belastungsfrequenzen (von der Haar et al. 2015)

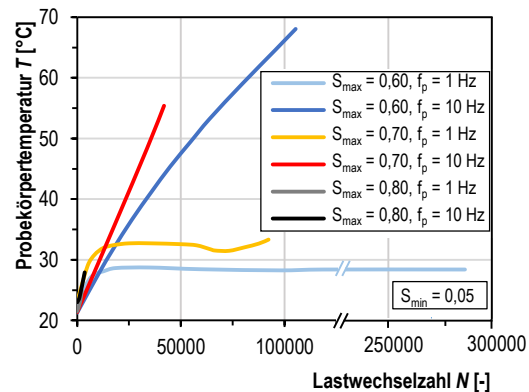


Bild 8: Probekörpertemperaturen eines höherfesten Normalbetons auf unterschiedlichen Lastniveaus und unter 1 Hz und 10 Hz (von der Haar et al. 2015)

Aufgrund der beschriebenen Beobachtungen scheint die Belastungsfrequenz durch mehrere Effekte den Ermüdungswiderstand von Beton zu beeinflussen. Zum einen beeinflusst die Belastungsgeschwindigkeit die Betonsteifigkeit und –festigkeit. So führen höhere Belastungsgeschwindigkeiten bzw. Belastungsfrequenzen zu höheren Betonfestigkeiten und somit zu einem höheren Ermüdungswiderstand. Zum anderen rufen höhere Belastungsfrequenzen auch höhere Probekörpertemperaturen hervor. Durch interne Rissreibungsprozesse im Bereich der Mesoskala können die Probekörpertemperaturen bei bestimmten Verhältnissen zwischen Beanspruchungsniveau und Belastungsfrequenz stark ansteigen. Dabei scheint eine höhere Probekörpertemperatur einen nachteiligen Effekt auf den Ermüdungswiderstand von Beton auszuüben. Das Zusammenspiel der beiden beschriebenen Effekte ist derzeit noch nicht untersucht. Daher existiert gegenwärtig auch kein Materialmodell, das den Einfluss beider Effekte auf den Ermüdungswiderstand von Beton beschreibt. Die in diesem Aufsatz beschriebenen Untersuchungen sollen einen Beitrag zur weiteren Erforschung beider Effekte leisten.

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

3.1 Konzeptionelle Überlegungen

Bislang existieren keine Untersuchungen, welche den in Abs. 2 beschriebenen wechselnden Einfluss der Belastungsfrequenz auf das Ermüdungsverhalten von hochfestem Beton beschreiben. Mithilfe des nachfolgenden Versuchskonzepts soll der Hypothese nachgegangen werden, dass der Frequenzeinfluss auf hohen Oberspannungsniveaus $S_{\max} > 0,75$ überwiegend auf einen Spannungsgeschwindigkeitseinfluss auf die Druckfestigkeit und auf niedrigeren Oberspannungsniveaus $S_{\max} < 0,75$ überwiegend auf einem gefügeschädigenden Temperatureinfluss beruht. Hierzu wurden zunächst Ermüdungsversuche auf drei Beanspruchungsniveaus und mit drei Belastungsfrequenzen von 2 Hz, 4 Hz und 7 Hz durchgeführt. Vergleichend dazu wurden weitere Ermüdungsversuche mit 4 Hz und 7 Hz durchgeführt, deren Lastaufbringung nach bestimmten Zeitperioden pausiert wurde. Mithilfe der Belastungspausen sollten die Probekörpertemperaturen der 4 Hz und 7 Hz Versuche während der Versuchsdauer begrenzt und an die Temperaturen der 2 Hz Versuche angeglichen werden. Die Versuche mit der Belastungsfrequenz von 2 Hz wurden nicht pausiert und dienten somit als Referenzversuche.

3.2 Versuchsprogramm

3.2.1 Betoneigenschaften und Probekörperherstellung

Die experimentellen Untersuchungen fanden an zylindrischen Probekörpern ($d/h = 100/300$ mm) aus einem hochfesten, selbstverdichtenden Beton mit einer beabsichtigten Druckfestigkeit von etwa 120 MPa statt. Die Probekörper wurden in eigens entwickelten Kunststoffschalungen hergestellt. Die Stirnflächen der Probekörper wurden für die Gewährleistung einer gleichmäßigen Lasteinleitung plan geschliffen. Bis zu Versuchsbeginn lagerten die Probekörper in einer Klimakammer bei 20 °C (± 2 °C) Lufttemperatur und 65 % (± 5 %) relativer Luftfeuchte. Angaben zur Betonzusammensetzung sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Betonzusammensetzung

Zement	CEM I 52,5 R
W/Z-Wert	0,35
Gesteinskörnung	Quarzkies
Größtkorndurchmesser	16 mm

3.2.2 Versuche unter monoton steigender Belastung

Vor Beginn der Ermüdungsversuche wurden Versuche unter monoton steigender Beanspruchung durchgeführt. Diese dienten zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit und der Bruchdehnung sowie deren Änderung in Abhängigkeit von der Spannungsgeschwindigkeit. Zunächst erfolgten die Versuche mit einer Spannungsgeschwindigkeit von $\dot{\sigma}_{\text{stat}} = 0,5$ MPa/s gemäß DIN EN 12390-3 (2009). Danach schlossen sich Versuche mit erhöhten Spannungsgeschwindigkeiten von $\dot{\sigma}_{\text{stat}} = 360$ MPa/s, 720 MPa/s und 1.440 MPa/s an. Diese entsprachen den erwarteten mittleren Spannungsgeschwindigkeiten $\dot{\sigma}_m$ während der anschließenden Ermüdungsversuche auf einem Beanspruchungsniveau von $S_{\min}/S_{\max} = 0,05/0,80$ und mit Belastungsfrequenzen von 2 Hz, 4 Hz und 8 Hz. Je Versuchsreihe wurden mindestens drei Proben geprüft.

3.2.3 Versuche unter Druckschwellbelastung

Die Ermüdungsversuche mit und ohne Belastungspausen wurden auf einem Unterspannungsniveau von $S_{\min} = 0,05$ und auf Oberspannungsniveaus von $S_{\max} = 0,80, 0,75$ und $0,70$ durchgeführt. Diese Beanspruchungsniveaus wurden aufgrund dessen gewählt, da im Bereich dieser Oberspannungsniveaus von Elsmeier (2015) und von der Haar et al. (2015) eine Umkehr des Frequenzeinflusses beobachtet wurde. Als Belastungsfrequenzen wurden 2 Hz, 4 Hz und 7 Hz gewählt. Die zuvor beabsichtigte Belastungsfrequenz von 8 Hz musste aufgrund versuchstechnischer Gegebenheiten auf 7 Hz reduziert werden. Mithilfe der Belastungspausen, die sich jeweils an ein Belastungsintervall anschlossen, sollten die Probekörpertemperaturen der 4 Hz und 7 Hz Versuche während der Versuchsdauer begrenzt und an die Temperaturen der 2 Hz Versuche angeglichen werden. Tabelle 2 zeigt das Versuchsprogramm der Ermüdungsversuche.

Tabelle 2: Versuchsprogramm unter Ermüdungsbeanspruchungen

f_p [Hz]	S_{\min} [-]	S_{\max} [-]	$\dot{\sigma}_m$ [MPa/s]	S_{cr} [-]	$N_{\text{Intervall}}$ [-]	$t_{\text{Belastung}}$ [s]	t_{Pause} [s]	Anzahl
2	0,05	0,80	360	-	-	-	-	3
		0,75	336	-	-	-	-	3
		0,70	312	-	-	-	-	3
4	0,05	0,80	720	-	-	-	-	3
		0,75	672	-	-	-	-	3
		0,70	624	-	-	-	-	3
4 ^{A)}	0,05	0,80	720	0,512	480	120	120	3
		0,75	672	0,479	960	240	240	3
		0,70	624	0,447	1.920	480	480	3
7	0,05	0,80	1.260	-	-	-	-	3
		0,75	1.176	-	-	-	-	3
		0,70	1.092	-	-	-	-	3
7 ^{A)}	0,05	0,80	1.260	0,512	480	68,6	171,4	3
		0,75	1.176	0,479	960	137,1	342,9	3
		0,70	1.092	0,447	1.920	274,3	685,7	3

^{A)} Versuche mit Belastungspause

Bei gleichbleibendem Unterspannungsniveau führen höhere Oberspannungsniveaus zu steileren Temperaturanstiegen und höheren Probekörpertemperaturen. Daher wurden die Lastwechselzahlen der Belastungsintervalle $N_{\text{Intervall}}$ derart begrenzt, dass die absoluten Temperaturunterschiede zu den 2 Hz Versuchen nicht mehr als 5 K betragen. Weiterhin wurden die Intervalllastwechselzahlen $N_{\text{Intervall}}$ für jedes nächsthöhere Oberspannungsniveau halbiert. Aus den gewählten Intervalllastwechselzahlen und den Belastungsfrequenzen ergaben sich schließlich die entsprechenden Belastungszeiten $t_{\text{Belastung}}$ und Pausenzeiten t_{Pause} . Während der Belastungspausen wurden die Proben konstant auf dem kriechaffinen Beanspruchungsniveau S_{cr} nach von der Haar (2017) belastet, siehe Tabelle 2. Dieses Beanspruchungsniveau liegt zwischen dem Mittel- und Oberspannungsniveau und ruft während des Belastungszeitraums die gleiche viskose Kriechdehnung hervor, wie sie während desselben Zeitraums unter zyklischer Belastung erzeugt würde. Für alle Versuche wurde eine servohydraulische Universalprüfmaschine des Herstellers Walter & Bai mit einer maximal erzeugbaren Druckkraft von 2,5 MN verwendet. Neben den Versuchslasten wurden die Probekörperverformungen in Längsrichtung, die Pro-

bekörpertemperaturen und die Umgebungstemperatur kontinuierlich aufgezeichnet, siehe Bild 9. Die Probekörperverformungen wurden zwischen den Druckplatten mithilfe von drei Laserdistanzsensoren gemessen, die im Winkel von 120° angeordnet waren. Die Probekörpertemperaturen wurden an der Oberfläche mit Thermoelementen TYP T an drei über die Probekörperhöhe verteilten Messstellen gemäß Bild 9 gemessen. Zusätzlich wurde die Umgebungstemperatur mit einem Pt 100 Temperatursensor registriert.

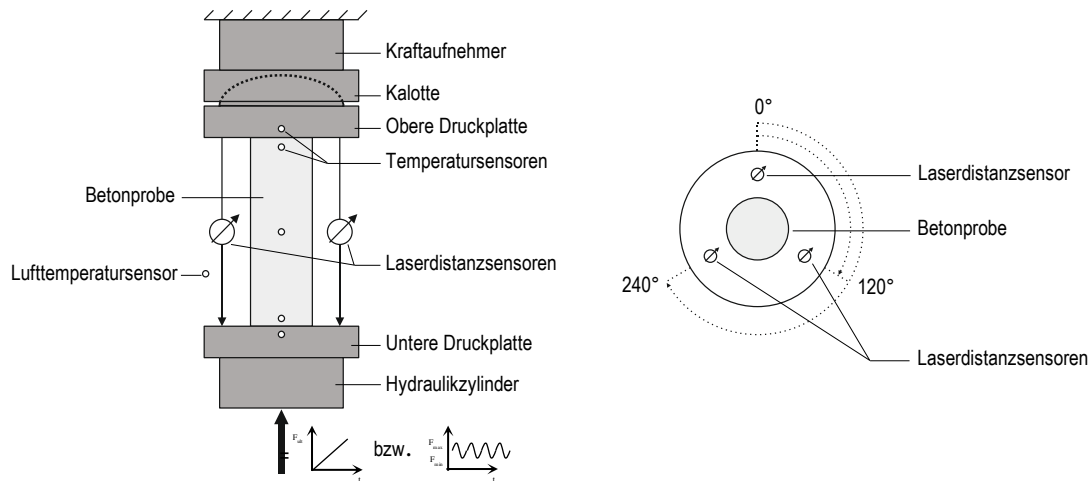


Bild 9: Schematischer Versuchsaufbau

4 ERGEBNISSE

4.1 Druckfestigkeiten

Vor Beginn der Ermüdungsversuche wurden im jüngsten Alter von 109 Tagen Druckfestigkeitsuntersuchungen mit einer Spannungsgeschwindigkeit von $\dot{\sigma}_{\text{stat}} = 0,5 \text{ MPa/s}$ durchgeführt. Diese wurden im Alter von 152, 243, 440 und 455 Tagen wiederholt, um die Zementnacherhärtung zu erfassen.

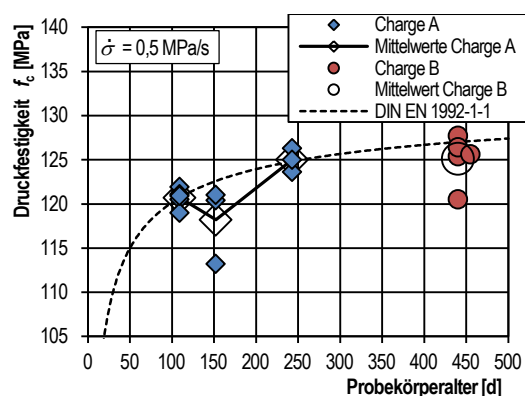


Bild 10: Druckfestigkeiten in Abhängigkeit vom Probekörperalter

Bild 10 zeigt die Druckfestigkeiten des untersuchten Betons in Abhängigkeit vom Probenalter. Vergleichend dazu ist die normative Entwicklungskurve der Druckfestigkeit gemäß DIN EN 1992-1-1 (2011) abgebildet. Die mittlere Druckfestigkeit der 109 Tage alten Proben lag bei 120,7 MPa. Die Festigkeit der 152 Tage alten Proben war aufgrund der höheren Streuung mit 118,2 MPa etwas gering.

ger. Da eine Abnahme der Druckfestigkeit mit zunehmendem Probekörperalter nur mit der höheren Streuung der Versuchsergebnisse begründet werden konnte, wurde die Referenzdruckfestigkeit von 120,7 MPa beibehalten. Diese wurde im Alter von 243 Tagen auf 125 MPa angehoben. Die Dehnungen beim Erreichen der Druckfestigkeiten lagen im Bereich zwischen -3,02 ‰ und -3,48 ‰. Eine Ausnahme bildete mit -2,82 ‰ der Probekörper mit der Druckfestigkeit von 113,2 MPa.

Wird das Materialverhalten unter monoton steigender Beanspruchung für erhöhte Spannungsgeschwindigkeiten betrachtet, so ist eine Erhöhung der Druckfestigkeit bei gleichzeitig erhöhten Bruchdehnungen festzustellen. Dies zeigt sich in Bild 11, in dem die gemittelten Spannungs-Dehnungslinien der Versuche in einem Alter von 152 bis 153 Tagen mit unterschiedlichen Spannungsgeschwindigkeiten dargestellt sind. In Bild 12 sind die ermittelten Druckfestigkeiten über der Spannungsgeschwindigkeit aufgetragen. Gleichzeitig werden die nach CEB (1988), CEB (1993) und FIB (2013) erwarteten Druckfestigkeitsentwicklungen dargestellt. Es ist zu sehen, dass alle drei Ansätze die versuchstechnisch ermittelten Druckfestigkeiten unterschätzen. Die versuchstechnisch bestimmten spannungsgeschwindigkeitsabhängigen Druckfestigkeiten können nach Gl. (1) errechnet werden.

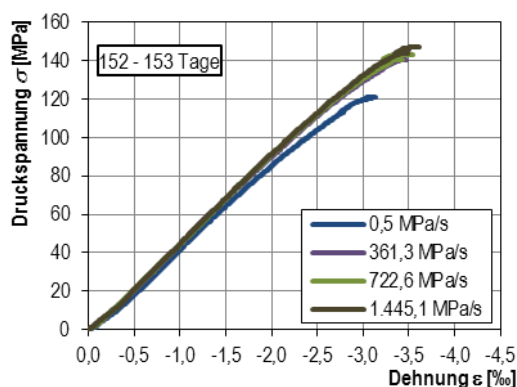


Bild 11: Gemittelte Spannungs-Dehnungslinien der Probekörper mit unterschiedlichen Spannungsgeschwindigkeiten

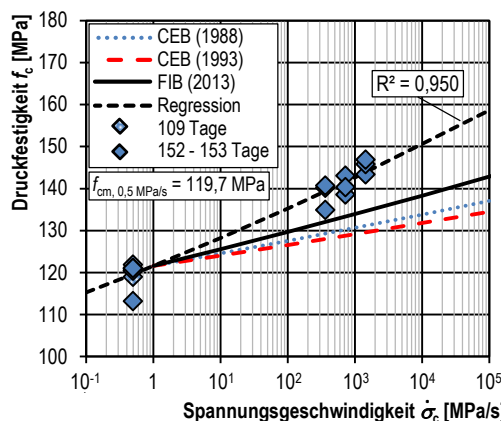


Bild 12: Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Spannungsgeschwindigkeit im Vergleich mit den Druckfestigkeitsentwicklungen nach CEB (1988), CEB (1993) und FIB (2013)

$$\frac{f_c(\dot{\sigma}_c)}{f_{cm,0,5MPa/s}} = \left(\frac{\dot{\sigma}_c}{\dot{\sigma}_{c,0,5MPa/s}} \right)^\alpha \quad (1)$$

mit: $\dot{\sigma}_{c,0,5MPa/s}$ = 0,5 MPa/s

$\dot{\sigma}_c$ Spannungsgeschwindigkeit in MPa/s

$f_c(\dot{\sigma}_c)$ Druckfestigkeit in MPa bei $\dot{\sigma}_c$

$f_{cm,0,5MPa/s}$ Mittlere Druckfestigkeit bei 0,5 MPa/s in MPa
= 119,66 MPa

α = 0,0231

4.2 Bruchlastwechselzahlen

Bild 13 zeigt die Bruchlastwechselzahlen der Ermüdungsversuche ohne Belastungspausen. Mit einer Ausnahme liegen alle Bruchlastwechselzahlen oberhalb der Wöhlerlinie gemäß Model Code 2010 FIB (2013). Lediglich ein Versuch auf $S_{\max} = 0,70$ und mit einer Belastungsfrequenz von 7 Hz lag mit $N = 55.131$ Lastwechseln geringfügig unter der Wöhlerlinie nach Model Code 2010 mit $N_{MC2010} = 57.489$ Lastwechseln. Ein Versuch auf $S_{\max} = 0,70$ und mit einer Belastungsfrequenz von 2 Hz musste nach $N = 1.228.501$ Lastwechseln aus zeitlichen Gründen abgebrochen und als Durchläufer gezählt werden. Auf dem Oberspannungsniveau $S_{\max} = 0,80$ erreichten die höherfrequenten Versuche höhere Bruchlastwechselzahlen als die 2 Hz Versuche. Dies war aufgrund der höheren Spannungsgeschwindigkeiten zu erwarten. Allerdings stellte sich ein entsprechender Unterschied zwischen den 4 Hz und 7 Hz Versuchen nicht ein. Deren mittlere Bruchlastwechselzahlen waren nahezu gleich groß. Auf dem Oberspannungsniveau $S_{\max} = 0,75$ ergaben die höherfrequenten Versuche ebenfalls leicht höhere Bruchlastwechselzahlen als die 2 Hz Versuche, allerdings lagen die Bruchlastwechselzahlen der 7 Hz Versuche nun unterhalb denen der 4 Hz Versuche. Auf dem Oberspannungsniveau $S_{\max} = 0,70$ ergaben nunmehr die 7 Hz Versuche die niedrigste mittlere Bruchlastwechselzahl, gefolgt von den 4 Hz und 2 Hz Versuchen. Wie schon durch Elsmeier (2015) und von der Haar et al. (2015) beschrieben, kehrte sich der Frequenzeinfluss auch bei dem hier untersuchten Beton zwischen den Oberspannungsniveaus $S_{\max} = 0,80$ und $S_{\max} = 0,70$ um. Die Regressionsgeraden in Bild 14 unterstützen diese Beobachtung.

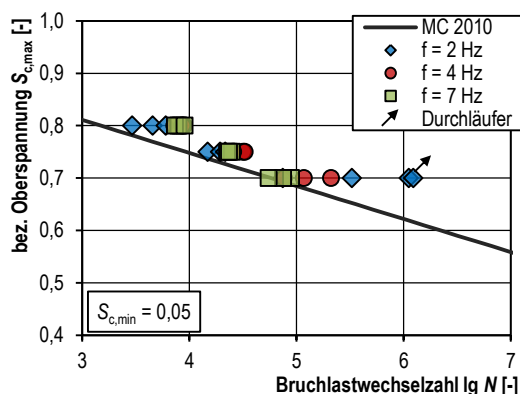


Bild 13: Bruchlastwechselzahlen ohne Belastungspausen im Vergleich zur Wöhlerkurve nach FIB (2013)

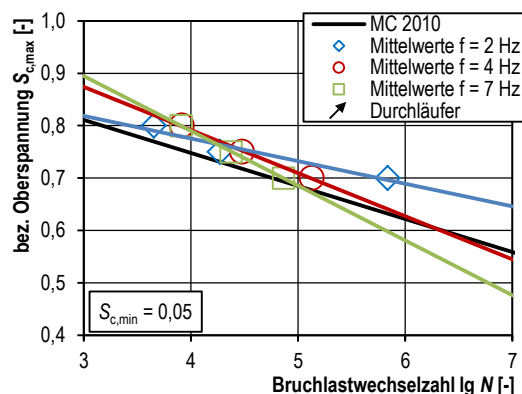


Bild 14: Mittlere Bruchlastwechselzahlen und Regressionsgeraden ohne Belastungspausen im Vergleich zur Wöhlerkurve nach FIB (2013)

Um den Einfluss der Probekörpertemperatur gegenüber den 2 Hz Versuchen zu eliminieren, wurden Ermüdungsversuche mit einer Belastungsfrequenz von 4 Hz und 7 Hz mit Belastungspausen durchgeführt. Deren Bruchlastwechselzahlen sind vergleichend mit denen der ununterbrochenen 2 Hz Versuche und der Wöhlerlinie gemäß Model Code 2010 FIB (2013) in Bild 15 dargestellt. Bild 16 zeigt die mittleren Bruchlastwechselzahlen mit den zugehörigen Regressionsgeraden.

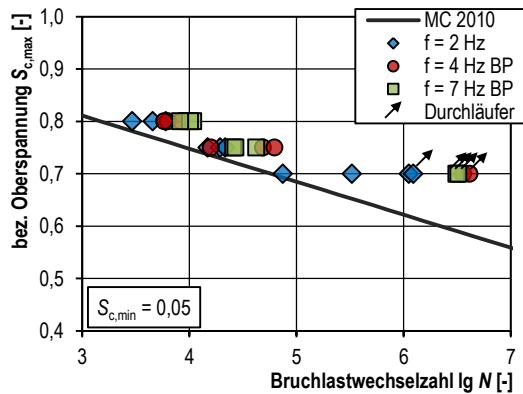


Bild 15: Bruchlastwechselzahlen mit Belastungspausen im Vergleich zur Wöhlerkurve nach FIB (2013)

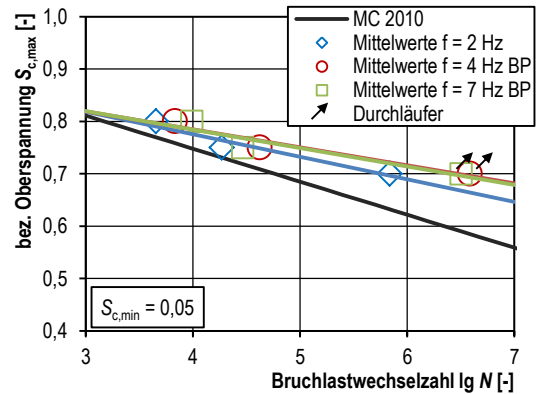


Bild 16: Mittlere Bruchlastwechselzahlen und Regressionsgeraden mit Belastungspausen im Vergleich zur Wöhlerkurve nach FIB (2013)

Auf dem Oberspannungsniveau $S_{max} = 0,80$ führen höhere Belastungsfrequenzen zu höheren mittleren Bruchlastwechselzahlen. Auf dem Oberspannungsniveau $S_{max} = 0,75$ liegen die Bruchlastwechselzahlen der 7 Hz Versuche ähnlich wie bei den Versuchen ohne Belastungspausen zwischen den 2 Hz und 4 Hz Versuchen. Die signifikantesten Änderungen sind auf dem Oberspannungsniveau $S_{max} = 0,70$ zu beobachten, auf dem die Ermüdungswiderstände der 4 Hz und 7 Hz Versuche mit Belastungspausen deutlich über den 2 Hz Versuchen liegen. Dabei mussten alle 4 Hz und 7 Hz Versuche abgebrochen und als Durchläufer gewertet werden. Deren tatsächlichen Bruchlastwechselzahlen konnten nicht festgestellt werden.

4.3 Temperaturentwicklungen unter Ermüdungsbeanspruchungen

Während der Ermüdungsversuche erwärmen sich die Probekörper infolge der Energieumwandlungsprozesse im Probeninneren. Dabei ist die Temperaturentwicklung vom Beanspruchungsniveau und von der Belastungsfrequenz abhängig. Bild 17 zeigt die zeitlichen Temperaturänderungen der untersuchten Probekörper ohne Belastungspausen. Die dargestellte Temperaturänderung ΔT_t beschreibt den Temperaturunterschied zwischen der Temperatur T_t zum Zeitpunkt t und der Temperatur T_{t_0} zu Versuchsbeginn gemäß Gl. (2).

$$\Delta T_t = T_t - T_{t_0} \quad (2)$$

Die Temperaturänderungen der Probekörper auf dem Oberspannungsniveau $S_{max} = 0,80$ verlaufen annähernd linear mit einem von der Belastungsfrequenz abhängigen Anstieg. Die unterschiedlichen Anstiege sind vorrangig auf die unterschiedlichen aufgebrauchten Lastwechselzahlen innerhalb derselben Zeitperiode zurückzuführen. Während der Versuche wird ein gewisser Teil der in den Probekörper eingebrachten Energie durch innere Rissreibungsprozesse in Wärmeenergie umgewandelt. Demnach lässt sich vermuten, dass der lineare Temperaturanstieg direkt proportional zur Belastungsfrequenz ist. Diese direkte Proportionalität besteht allerdings nicht zwischen der Belastungsfrequenz und der Versuchsdauer, weshalb sich die 2 Hz Versuche nicht auf die gleiche Temperatur wie die 4 Hz und 7 Hz Versuche erwärmen.

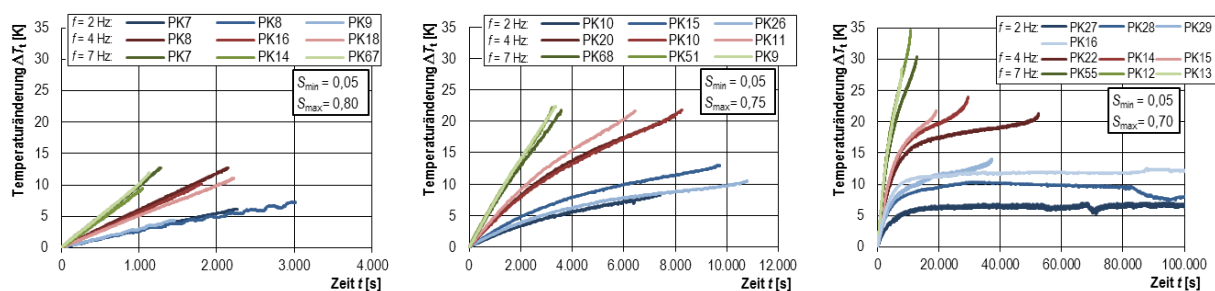


Bild 17: Temperaturänderungen ΔT_i der Versuche ohne Belastungspause auf mittlerer Probekörperhöhe

Eine Verringerung des Beanspruchungsniveaus führt zu einer Verringerung des Temperaturanstiegs sowie zu einer Erhöhung der Bruchlastwechselzahlen und somit wiederum der Versuchslaufzeiten. Dies zeigt sich für die Temperaturänderungen unter dem Oberspannungsniveau $S_{\max} = 0,75$ in Bild 17. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass sich ein zwei- bis dreiphasiger Temperaturverlauf einstellt, wobei der Übergang vom linearen in den nichtlinearen Temperaturverlauf im Bereich zwischen 1.000 bis 1.500 s liegt. Der nichtlineare Temperaturverlauf ist von einer abnehmenden Temperaturerhöhung gekennzeichnet. Hierfür ist vermutlich in erster Linie die Zunahme der vom Probekörper durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung an die Umgebung abgegebene Wärmeenergie ursächlich. Diese Zunahme ist auf die steigende Temperaturdifferenz zwischen dem Probekörper und der Umgebung zurückzuführen. Vor dem Eintritt des Ermüdungsversagens ist bei allen Probekörpern ein leicht überproportional zunehmender Temperaturanstieg zu verzeichnen. Dieser ist auf die Zunahme der Gefügeschädigung und der damit verbundenen Zunahme innerer Reibungseffekte zurückführbar. Um die Temperaturverläufe der Versuche auf dem Oberspannungsniveau $S_{\max} = 0,70$ in Bild 17 geeignet darstellen zu können, wurde die Abszissenskalierung auf eine Zeit von 100.000 s begrenzt. Die Verringerung des Beanspruchungsniveaus führt bei drei der vier 2 Hz Versuche zu einer Ausbildung von quasi stationären Temperaturverläufen. Diese werden lediglich von der schwankenden Umgebungstemperatur beeinflusst. Bei diesen Versuchen stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der im Probekörper je Zeiteinheit in Wärmeenergie umgewandelten Energiemenge und der gleichzeitig vom Probekörper an die Umgebung abgegebenen Wärmeenergiemenge ein. Aufgrund einer stärkeren Schädigungszunahme entwickelte sich beim Probekörper 29 kein ausgeprägt konstantes Temperaturniveau. Nach der Ausbildung der linearen und nichtlinearen Temperaturerhöhung setzte ein überproportionaler Temperaturanstieg bis zum Ermüdungsversagen ein. Eine vergleichbare Temperaturentwicklung trat bei den Versuchen mit einer Belastungsfrequenz von 4 Hz und auch im verkürzten Maß bei den Versuchen mit einer Belastungsfrequenz von 7 Hz auf. Allerdings treten auf diesem Beanspruchungsniveau die größten frequenzabhängigen Temperaturunterschiede auf.

Bild 18 zeigt die Temperaturänderungen ΔT_i der 4 Hz und 7 Hz Versuche mit Belastungspausen im Vergleich zu den 2 Hz Versuchen ohne Belastungspausen. Die Belastungsphasen und -pausen sind durch die Temperaturerhöhungen und -abnahmen deutlich in den Diagrammen erkennbar. Grundsätzlich wird deutlich, dass sich auf den Oberspannungsniveaus $S_{\max} = 0,80$ und $0,75$ die mittleren Temperaturkurven der Versuche mit Belastungspausen weitestgehend an die der 2 Hz Versuche angleichen. Auf dem Oberspannungsniveau $S_{\max} = 0,70$ weisen die pausierten Versuche geringfügig niedrigere Temperaturänderungen als die 2 Hz Versuche auf. Jedoch konnten die starken frequenzbedingten Temperaturunterschiede zumindest deutlich reduziert werden. Somit liegen auf den jeweiligen Lastniveaus die versuchstechnischen Unterschiede lediglich in der Belastungsfrequenz bzw. Beanspruchungsgeschwindigkeit.

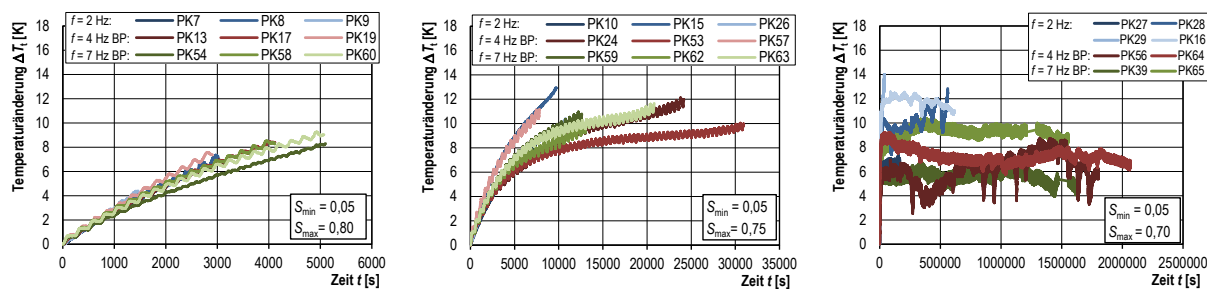


Bild 18: Temperaturänderungen ΔT_i der Versuche mit Belastungspause auf mittlerer Probekörperhöhe

5 DISKUSSION

5.1 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit

Wie bereits erwähnt, kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Belastungsfrequenz unter anderem auf die erhöhten Druckfestigkeiten unter hohen Spannungsgeschwindigkeiten zurückgeführt werden kann. Die Spannungsgeschwindigkeit beschreibt dabei die erste zeitliche Ableitung der Spannung nach der Zeit, siehe Gl. (3).

$$\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} \quad (3)$$

Bei einer sinusförmigen Beanspruchungs-Zeit-Funktion ändert sich die Spannungsgeschwindigkeit kontinuierlich, siehe Bild 19. Dabei tritt die maximale Spannungsgeschwindigkeit $\dot{\sigma}_{\max}$ nur an den Wendepunkten der Beanspruchungs-Zeit-Funktion auf. Vereinfachend kann eine mittlere Spannungsgeschwindigkeit $\dot{\sigma}_m$ angegeben werden, die den mittleren Spannungsanstieg zwischen der Unterspannung σ_{\min} und der Oberspannung σ_{\max} innerhalb eines halben Beanspruchungsintervalls t_m beschreibt.

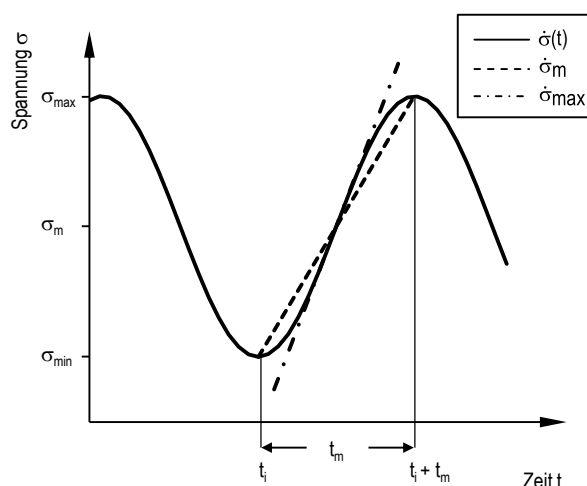


Bild 19: Sinusförmige Beanspruchungs-Zeit-Funktion mit mittlerer und maximaler Spannungsgeschwindigkeit

Ist die Belastungsfrequenz und die Spannungsschwingbreite bekannt, so lassen sich die maximale und mittlere Spannungsgeschwindigkeit nach Gl. (4) bzw. Gl. (5) bestimmen.

$$\dot{\sigma}_{max} = \Delta\sigma \cdot f \cdot \pi \quad (4)$$

$$\dot{\sigma}_m = \Delta\sigma \cdot f \cdot 2 \quad (5)$$

Da die maximale Spannungsgeschwindigkeit $\dot{\sigma}_{max}$ nur zweimal für kurze Zeit während eines Belastungszyklus auftritt, wird im Weiteren die mittlere Spannungsgeschwindigkeit $\dot{\sigma}_m$ für die Berechnung der Druckfestigkeitssteigerung infolge der zyklischen Belastung verwendet. Werden ferner die Ober- und Unterdrückungen σ_{max} und σ_{min} nicht auf die Druckfestigkeit bei einer Spannungsgeschwindigkeit von $\dot{\sigma} = 0,5 \text{ MPa/s}$ sondern auf die Druckfestigkeit $f_c(\dot{\sigma}_c)$ bezogen, die sich infolge derselben mittleren Spannungsgeschwindigkeit ergibt wie sie im Ermüdungsversuch auftritt, lassen sich nach Gl. (6) und Gl. (7) die effektiven Spannungsniveaus $S_{min,eff}$ und $S_{max,eff}$ bestimmen. Unter den verwendeten Belastungsfrequenzen sind die effektiven Beanspruchungsniveaus $S_{min,eff}$ und $S_{max,eff}$ geringer als die Beanspruchungsniveaus S_{min} und S_{max} . Mit dieser theoretischen Überlegung lassen sich Wöhlerlinien aus Versuchen mit gleichen Temperaturentwicklungen aber unterschiedlichen Belastungsfrequenzen ineinander umrechnen.

$$S_{min,eff} = \frac{\sigma_{min}}{f_c(\dot{\sigma}_c)} = \frac{\sigma_{min}}{\left(\frac{\dot{\sigma}_c}{\dot{\sigma}_{c,0,5\text{MPa/s}}}\right)^\alpha \cdot f_{cm,0,5\text{MPa/s}}} = S_{min} \cdot \left(\frac{\dot{\sigma}_{c,0,5\text{MPa/s}}}{\dot{\sigma}_{m,f_i}}\right)^\alpha \quad (6)$$

$$S_{max,eff} = \frac{\sigma_{max}}{f_c(\dot{\sigma}_c)} = \frac{\sigma_{max}}{\left(\frac{\dot{\sigma}_c}{\dot{\sigma}_{c,0,5\text{MPa/s}}}\right)^\alpha \cdot f_{cm,0,5\text{MPa/s}}} = S_{max} \cdot \left(\frac{\dot{\sigma}_{c,0,5\text{MPa/s}}}{\dot{\sigma}_{m,f_i}}\right)^\alpha \quad (7)$$

In Bild 20 sind die nach Gl. (6) und Gl. (7) errechneten effektiven Beanspruchungsniveaus der 4 Hz und 7 Hz Versuche mit Belastungspausen und die der 2 Hz Versuche über deren jeweiligen Bruchlastwechselzahlen aufgetragen. Im Vergleich zu Bild 16 wurden die Wöhlerlinien zu niedrigeren Beanspruchungsniveaus verschoben. Darüber hinaus scheint es, als ob die Bruchlastwechselzahlen aller Versuche nahezu mit einer Wöhlerlinie beschrieben werden könnten. Ein Belastungsfrequenzeinfluss ist nicht mehr erkennbar. Die Approximation der Versuchsergebnisse durch die in Bild 20 dargestellten Wöhlerlinien könnte zukünftig durch nichtlineare Wöhlerlinien verbessert werden. Somit scheint sich, unter der Voraussetzung gleicher Probekörpertemperaturen, der Belastungsfrequenzeinfluss auf die Druckfestigkeitserhöhung unter erhöhten Spannungsgeschwindigkeiten zurückführen zu lassen.

In Bild 21 sind die effektiven Beanspruchungsniveaus der Versuche ohne Belastungspausen über deren jeweiligen Bruchlastwechselzahlen aufgetragen. Der zuvor beschriebene Effekt zeigt sich im Vergleich der Versuchsergebnisse unter verschiedenen Belastungsfrequenzen nicht. Grund hierfür liegt allem Anschein nach in den unterschiedlichen Probekörpertemperaturen, die insbesondere auf dem geringsten Oberspannungsniveau zu deutlich unterschiedlichen Bruchlastwechselzahlen führten.

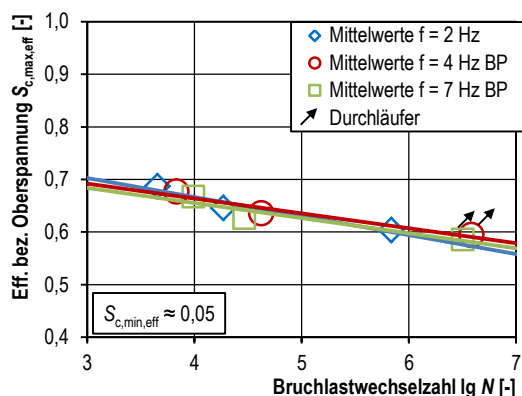


Bild 20: Wöhlerdiagramm mit effektiven Beanspruchungsniveaus der Versuche mit Belastungspausen

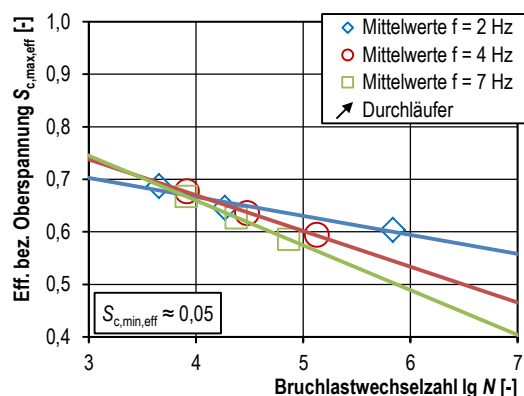


Bild 21: Wöhlerdiagramm mit effektiven Beanspruchungsniveaus der Versuche ohne Belastungspausen

5.2 Einfluss der Probekörpertemperatur

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, scheint die Probekörpertemperatur einen signifikanten Einfluss auf den Ermüdungswiderstand von Beton zu besitzen. Dies zeigt sich insbesondere durch die Bruchlastwechselzahlen der Versuche ohne Belastungspausen auf dem niedrigsten Oberspannungsniveau. Auf dem höchsten Beanspruchungsniveau scheint der Probekörpertemperatur keinen deutlichen Einfluss auf den Ermüdungswiderstand auszuüben, da die Versuchszeiten zu kurz und dadurch die Temperaturunterschiede infolge der unterschiedlichen Belastungsfrequenzen zu gering sind. Wie genau jedoch eine erhöhte Probekörpertemperatur die Gefügestruktur während der Ermüdungsversuche schädigt ist derzeit noch nicht genau belegt. Allerdings existieren diesbezüglich mehrere Hypothesen. So führt eine Temperaturzunahme zu einer Verringerung der Betondruckfestigkeit. Dies wird zum einen auf die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften der Gesteinskörnung und des Zementsteins zurückgeführt, wodurch zusätzliche Spannungen zwischen der Gesteinskörnung und dem Zementstein entstehen und zu einer Mikrorissbildung führen können. Diese könnten ein vorzeitiges Ermüdungsversagen begünstigen. Zum anderen kann ein innerer Wasserdampfdruck zu Zugspannungen und zusätzlichen Schädigungen in der Gefügestruktur führen. Für die Beschreibung dieser temperaturbedingten Schädigungsmechanismen bedarf es allerdings weiterer Untersuchungen.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Das Ermüdungsverhalten von druckschwellbeanspruchtem Beton wurde in der Literatur überwiegend mit Belastungsfrequenzen zwischen 1 Hz und 10 Hz untersucht. Um die Versuchszeiten zu verkürzen werden hohe Belastungsfrequenzen favorisiert. Allerdings weist die Belastungsfrequenz einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf den Ermüdungswiderstand auf. Auf Grundlage der Literatur konnte der Einfluss der Belastungsfrequenz mit dem Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit und dem Einfluss der Probekörpertemperatur begründet werden. Für Oberspannungsniveaus $S_{\max} \geq 0,75$ scheint der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit dominant zu sein. Hier führen höhere Belastungsfrequenzen zu höheren Belastungsgeschwindigkeiten. Diese führen wiederum zu einer erhöhten Druckfestigkeit und einem erhöhten Ermüdungswiderstand. Für Oberspannungsniveaus $S_{\max} < 0,75$ scheint der Temperatureffekt einen bedeutenderen Einfluss auf den Ermüdungswiderstand zu gewinnen. Hier führen höhere Belastungsfrequenzen zu höheren Probekörpertemperaturen, welche sich negativ auf den Ermüdungswiderstand auswirken.

Um den Einfluss der beiden beschriebenen Effekte separat zu betrachten, wurden Ermüdungsversuche mit Belastungsfrequenzen von 2 Hz, 4 Hz und 7 Hz ohne Belastungspausen sowie mit 4 Hz und 7 Hz mit Belastungspausen durchgeführt. Mithilfe der Belastungspausen sollte die Probekörpertemperatur der 4 Hz und 7 Hz Versuche an die der 2 Hz Versuche angeglichen werden. Der einzige versuchstechnische Unterschied bestand bei den pausierten Versuchen somit nur in den unterschiedlichen Belastungsfrequenzen bzw. Belastungsgeschwindigkeiten.

Die Versuche mit Belastungspausen zeigten, dass im Vergleich zu den 2 Hz Versuchen die höherfrequenten Versuche auch höhere Bruchlastwechselzahlen ergaben. Werden die Spannungen dieser Versuche auf die mittlere Druckfestigkeit bezogen, die sich unter der mittleren Spannungsgeschwindigkeit ergibt, wie sie auch während der Ermüdungsversuche auftritt, so scheinen die Versuchsergebnisse mit einer Wöhlerlinie beschreibbar zu sein. Ein ausgeprägter Belastungsfrequenzeinfluss ist nicht mehr zu erkennen. Bei den Versuchen ohne Belastungspausen kann dies nur für Oberspannungsniveaus $S_{\max} \geq 0,75$ bestätigt werden. Auf dem Oberspannungsniveau $S_{\max} = 0,70$, auf dem der Temperaturunterschied zwischen den Versuchen mit unterschiedlichen Belastungsfrequenzen am höchsten ist, liefern höhere Belastungsfrequenzen niedrigere Bruchlastwechselzahlen. Dies kann nicht mit dem Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit erklärt werden, sondern muss auf die erhöhten Probekörpertemperaturen infolge der erhöhten Belastungsfrequenzen zurückgeführt werden. Wie genau jedoch eine erhöhte Probekörpertemperatur die Gefügestruktur während der Ermüdungsversuche schädigt ist derzeit noch nicht genau belegt und bedarf weiterer Forschung.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem BMWi für die Förderung des Verbundforschungsvorhabens „WinConFat – Materialermüdung von On- und Offshore Windenergieanlagen aus Stahlbeton und Spannbeton unter hochzyklischer Beanspruchung“ sowie des Teilvorhabens „Betriebsbedingte Effekte auf die Betonermüdung“ (Fkz 0324016A).

LITERATUR

- CEB (1988): Comité Euro – International du Béton: Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading. Bulletin d'Information No. 187, Lausanne.
- CEB (1993): Comité Euro – International du Béton: CEB-FIP Model Code 1990. Bulletin d'Information No. 213/214, Thomas Telford Ltd,
- DIN EN 12390-3 (2009): Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Deutsche Fassung EN 12390-3:2009. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 1992-1-1 (2011): Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2001 + AC:2010. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin.
- Elsmeier, K. (2019): Einfluss der Probekörpererwärmung auf den Ermüdungswiderstand von hochfestem Vergussbeton. Dissertation, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 18, Leibniz Universität Hannover.
- FIB (2013): Fédération internationale du béton: fib Model Code for Concrete Structures 2010. Ernst & Sohn.
- Holmen, J. O. (1979): Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading. Division of Concrete Structures, The Norwegian Institute of Technology, The University of Trondheim.

- Kim, J.-K. & Kim, Y.-Y. (1996): Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete. *Cement and Concrete Research* No. 10, Vol. 26, S. 1513-1523.
- Marx, S., Grünberg, J., Hansen, M. & Schneider, S. (2017): Über den Stand der Forschung zu Grenzzuständen der Ermüdung von dynamisch hoch beanspruchten Tragwerken aus Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 618, Beuth Verlag, Berlin.
- Oneschkow, N. (2014): Analyse des Ermüdungsverhaltens von Beton anhand der Dehnungsentwicklung. Dissertation, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 13, Leibniz Universität Hannover.
- Oneschkow, N., von der Haar, C., Hümme, J., Otto, C., Lohaus, L., & Marx, S. (2018): Ermüdung von druckschwellbeanspruchtem Beton – Materialverhalten, Modellbildung, Bemessung, In Bergmeister, K., Fingerloos, F. & Wörner, J.-H. (Hrsg.), *Beton-Kalender 2018: Bautenschutz, Brandschutz*, Ernst & Sohn GmbH & Co. KG., Berlin, S. 645-755.
- Petkovic, G., Rosseland, S. & Stemland, H. (1992): High Strength Concrete SP 3 Fatigue, Report 3.2 - Fatigue of High Strength Concrete. SINTEF Report No. STF70 A92128, Trondheim.
- Siemes, A. J. M. (1982): Fatigue of plain concrete in uniaxial compression. IABSE Report 37, S. 283-292.
- Sparks, P. R. & Menzies, J. B. (1973): The effect of rate of loading upon the static and fatigue strengths of plain concrete in compression. *Magazine of Concrete Research*, No. 83, Vol 25, S. 73-80.
- Tepfers, R. & Kutti, T. (1979): Fatigue Strength of Plain, Ordinary, and Lightweight Concrete. *ACI Journal*, Vol. 76, No. 5, S. 635-652.
- van Leeuwen, J. & Siemes, A. J. M. (1979): Miner's rule with respect to plain concrete. *Heron* No. 1, Vol. 24.
- von der Haar, C. (2017): Ein mechanisch basiertes Dehnungsmodell für ermüdungsbeanspruchten Beton. Dissertation. Berichte des Instituts für Massivbau der Universität Hannover, Heft 11.
- von der Haar, C., Hümme, J., Marx, S. & Lohaus, L. (2015): Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten eines höherfesten Normalbetons. *Beton- und Stahlbetonbau*, Heft 10, Jahrgang 110, S. 699-709.