

Betonermüdung – Sicherheiten und Entwicklungspotenziale

Boso Schmidt¹, Sebastian Schneider¹ und Steffen Marx¹

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

KURZFASSUNG:

Das tatsächliche Sicherheitsniveau bei der Ermüdungsbemessung von druckschwellbeanspruchtem Beton ist derzeit unbekannt. In diesem Beitrag werden das Nachweiskonzept gegen Betonermüdung nach Model Code 2010 (FIB 2013) vorgestellt und die enthaltenen Sicherheiten diskutiert. Anhand des Vergleichs von stochastisch ausgewerteten bestehenden Ermüdungsuntersuchungen an ultra-hochfesten Betonen mit Wöhlerlinien nach Model Code 2010 werden Entwicklungspotenziale aufgezeigt. Die vergleichenden Untersuchungen deuten auf ein höheres Sicherheitsniveau des Ermüdungswiderstands im Vergleich zur statischen Bemessung hin.

Keywords: Ermüdung, Beton, Nachweiskonzept, Sicherheit, ultra-hochfester Beton

ABSTRACT:

The safety level for the fatigue design of concrete under compression is currently unknown. In this paper, the design concept for fatigue loaded concrete according to Model Code 2010 (FIB 2013) is presented and the contained safety factors are discussed. The comparison of stochastically evaluated existing fatigue tests on ultra-high-strength concretes with S-N-lines according to Model Code 2010 shows development potentials. The comparative investigations indicate a higher safety level of the fatigue resistance compared to the static design.

Keywords: fatigue, concrete, design concept, safety, ultra-high strength concrete

1 EINLEITUNG

Der zunehmende Einsatz von hochfesten und ultra-hochfesten Betonen führt zu einer immer größeren Anzahl schlanker und damit schwingungsanfälliger Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen. Gleichzeitig wächst die Anzahl von Bauwerken wie Windenergieanlagen und schlanke Straßen- und Eisenbahnbrücken, die stark ermüdungswirksam beansprucht werden. Beide Effekte führen dazu, dass der Ermüdungsnachweis immer häufiger maßgebend für die Bemessung wird. In Deutschland werden zum Nachweis gegen Betonermüdung die Bemessungsansätze nach dem Model Code 1990 (FIB 1993), Model Code 2010 (FIB 2013) oder der DIN EN 1992-1-1 (2011) angewendet bzw. ihre Anwendung diskutiert. Die Bemessungsansätze in diesen Regelwerken bestehen auf der Widerstandsseite im Wesentlichen aus zwei Komponenten: den Wöhlerlinien und dem Bemessungswert der Druckfestigkeit bei Ermüdungsbeanspruchung $f_{cd,fat}$. Sowohl der Ansatz von verschiedenen Wöhlerlinien aus den genannten Regelwerke als auch die unterschiedlichen Sicherheitselemente im Bemessungswert $f_{cd,fat}$ führen zu signifikant abweichenden Ergebnissen beim Ermüdungsnachweis. Die tatsächliche Sicherheit im derzeitigen Nachweiskonzept der Betonermüdung ist dabei nicht bekannt.

Dieser Beitrag basiert auf Angaben in Schmidt et al. (2019) und enthält darüber hinaus stochastische Auswertungen bestehender Ermüdungsuntersuchungen an einem ultra-hochfesten Beton und einen Vergleich mit den Wöhlerlinien nach fib Model Code 2010. Die vergleichenden Untersuchungen deuten auf ein höheres Sicherheitsniveau des Ermüdungswiderstands von ultra-hochfesten Betonen im Vergleich zur statischen Bemessung hin.

2 NACHWEISKONZEPTE VON DRUCKSCHWELLBEANSPRUCHTEM BETON

2.1 Wöhlerlinien für druckschwellbeanspruchten Beton

Es existieren zahlreiche Ermüdungsuntersuchungen an Beton unter einaxialer Druckschwellbeanspruchung, vgl. u. a. Weigler & Freitag (1971), Klausen (1978), Klausen & Weigler (1979), Holmen (1979), Hsu (1981), Hohberg (2004), Oneschkow (2014), von der Haar (2017). Die Betonprobekörper wurden bei diesen Untersuchungen zumeist mit Lastwechselzahlen bis zu $N = 10^6$ bzw. $N = 10^7$ beansprucht. Im Bereich von $N > 10^7$ liegen kaum Untersuchungsergebnisse vor und bestehende Wöhlerlinien in diesem Bereich stellen Abschätzungen dar. Wöhlerlinien beschreiben weitestgehend allgemeingültig den Zusammenhang zwischen den einwirkenden Ermüdungsbeanspruchungen (in der Regel auf den Mittelwert der Druckfestigkeit unter monoton steigender Beanspruchung f_{cm} bezogen) und den Bruchlastwechselzahlen. Letztere werden üblicherweise als logarithmierte Werte im Wöhlerdiagramm eingetragen. Durch den Bezug auf den Mittelwert der Betondruckfestigkeit wird davon ausgegangen, dass die Wöhlerlinien weitgehend unabhängig von der Betondruckfestigkeit, der Probekörpergeometrie und den Lagerungsbedingungen sind. Die Bemessungswöhlerlinien nach Model Code 1990 (FIB 1993) basieren im Wesentlichen auf den Ergebnissen von experimentellen Untersuchungen von Petkovic et al. (1992). Die Grundlage für die Wöhlerlinien nach DIN EN 1992-1-1 (2011) lässt sich mithilfe der Literatur nicht eindeutig belegen. Nach Danielewicz, I. (1994) entstammen Sie einer unveröffentlichten Diskussionsvorlage für den Model Code 1990 (FIB 1993). Die Wöhlerlinien nach Model Code 2010 (FIB 2013) basieren auf Versuchen an einem ultra-hochfesten Beton von Wefer (2010). In Lohaus et al. (2012) werden diese Wöhlerlinien anhand von Versuchen an normal- und hochfesten Betonen verifiziert. Die sich aus den experimentellen Untersuchungen ergebenden Wöhlerlinien stellen zunächst Regressionsgeraden/-kurven für die Mittelwerte der stark streuenden Bruchlastwechselzahlen der jeweiligen Beanspruchungsniveaus dar. Die erforderliche Sicherheit gegen ein Ermüdungsversagen wird durch die Reduktion der Bezugsdruckfestigkeit gewährleistet.

Bruchlastwechselzahlen von druckschwellbeanspruchtem Beton streuen stark. Die Streuung wird nach König & Danielewicz (1994) einzig auf die Streuung der Druckfestigkeit unter monoton steigender Beanspruchung bei den untersuchten Proben zurückgeführt. Im Ermüdungsnachweis wird statt der mittleren Druckfestigkeit f_{cm} die charakteristische Druckfestigkeit f_{ck} für die Berechnung des Bezugswerts $f_{cd,fat}$ verwendet und so die Streuung der Bruchlastwechselzahlen indirekt berücksichtigt. Ermüdungsversuche zeigen, dass die Streuungen der Bruchlastwechselzahlen für niedrige Beanspruchungsniveaus zunehmen, vgl. u. a. Holmen (1979) und Oh (1991). Die implizite Sicherheit von Wöhlerlinien ist somit abhängig vom Beanspruchungsniveau. Dieser Effekt wird durch die Tatsache verstärkt, dass für niedrigere Spannungsniveaus aufgrund der hohen Bruchlastwechselzahlen und den damit verbundenen langwierigen Versuchen kaum Ergebnisse vorliegen und die Wöhlerlinien weniger zuverlässig zu bestimmen sind. Oh wertete in diesem Zusammenhang die zunehmende Streuung der Bruchlastwechselzahlen bei abnehmenden Beanspruchungsniveaus aus und dokumentierte Veränderungen im Verlauf der von ihm verwendeten Weibullverteilung, vgl. Oh (1991). Die Ergebnisse basieren auf Vier-Punkt-Biegeversuchen an Stahlbetonbalken unter Ermüdungsbeanspruchung. Holmen (1979) hat Kurven entwickelt, die den Zusammenhang zwischen einem Beanspruchungsniveau und der Bruchlastwechselzahl für eine definierte Auftrittswahrscheinlichkeit beschreiben (S-N-P-Kurven), vgl. Bild 1 und Bild 2. Der Ansatz für druckschwellbeanspruchten Beton von Holmen basiert auf einem mathematischen Modell von McCall (1958) und legt die Annahme zugrunde, dass die logarithmierten Bruchlastwechselzahlen $\log N$ normalverteilt sind.

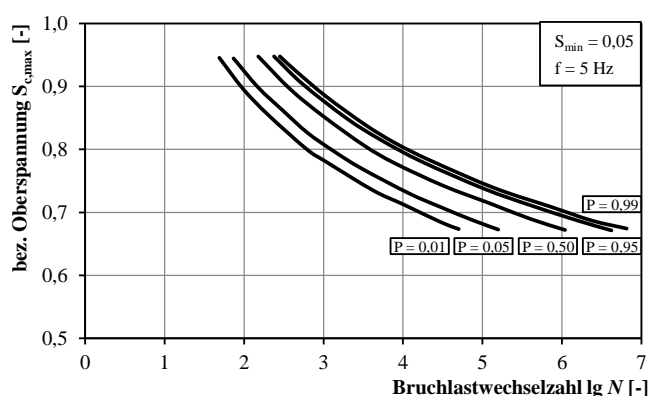


Bild 1: S-N-P-Kurven aus Holmen (1979)

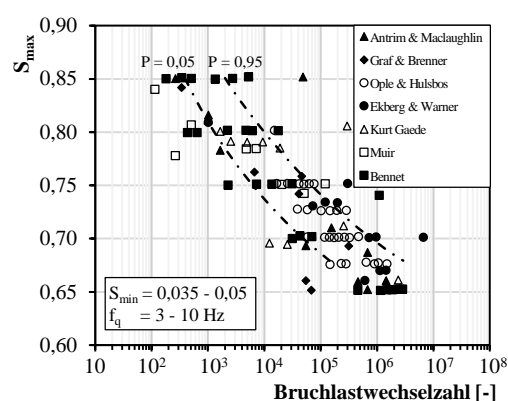


Bild 2: Ermüdungsfestigkeiten verschiedener Untersuchungen und S-N-P-Kurven für $P = 0,05$ und $P = 0,95$ aus Holmen (1979)

2.2 Bemessungswert der Betondruckfestigkeit unter Ermüdungsbeanspruchung $f_{cd,fat}$

Neben den experimentell ermittelten Wöhlerlinien beeinflusst der Bemessungswert der Druckfestigkeit bei Ermüdungsbeanspruchung $f_{cd,fat}$ die im Ermüdungsnachweis enthaltene Sicherheit. Innerhalb des Ermüdungsnachweises werden die Beanspruchungen auf den Bemessungswert $f_{cd,fat}$ bezogen. Der Zusammenhang zwischen diesen bezogenen Beanspruchungen und den Bruchlastwechselzahlen wird durch die Wöhlerlinie im halblogarithmischen Raum ausgedrückt. Der Bemessungswert $f_{cd,fat}$ entspricht dem Bemessungswert der Betondruckfestigkeit unter monoton steigender Beanspruchung f_{cd} , der für den Beanspruchungsfall Ermüdung zusätzlich abgemindert wird. Die Berechnung von $f_{cd,fat}$ erfolgt im Model Code 2010 (FIB 2013) nach Gl. (1).

$$f_{cd,fat} = \beta_{c,sus}(t, t_0) \cdot \beta_{cc}(t) \cdot f_{ck} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{400}\right) / \gamma_{c,fat} \quad (1)$$

mit: $\beta_{c,sus}(t, t_0) = 0,85$ Beiwert zur Berücksichtigung von Effekten hoher Mittelspannungen während der Ermüdungsbeanspruchung

$\beta_{cc}(t) = e^{s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)}$ Beiwert zur Berücksichtigung der Betondruckfestigkeit im Alter t des Betons bei Beginn der Ermüdungsbeanspruchung in d

s vom Zementtyp abhängiger Beiwert, siehe FIB (2013)

f_{ck} Charakteristische Betondruckfestigkeit in MPa

$\gamma_{c,fat}$ Teilsicherheitsbeiwert für Beton

Der festigkeitsabhängige Abminderungsterm $\alpha_{fat} = (1 - f_{ck} / 400)$ soll für Ermüdungsnachweise die charakteristische Betondruckfestigkeit für höherfeste Betone wegen deren sprödem Bruchverhalten zusätzlich abmindern, siehe König & Danielewicz (1994). Der Abminderungsterm α_{fat} in Model Code 2010 (FIB 2013) ist eine Modifikation des empirischen Terms nach Model Code 1990 (FIB 1993) bzw. DIN EN 1992-1-1 (2011). Er ermöglicht die Anwendung auf Betone mit einer Festigkeit $f_{ck} > 120$ MPa, die bei den Ansätzen nach Model Code 1990 (FIB 1993) bzw. DIN EN 1992-1-1 (2011) nicht sinnvoll gegeben ist. Der Abminderungsterm wurde so gewählt, dass für einen Beton mit einer Festigkeit von $f_{ck} = 120$ MPa die gleiche festigkeitsabhängige Abminderung vorliegt wie bei dem ursprünglichen Ansatz nach Model Code 1990 (FIB 1993) bzw. DIN EN 1992-1-1 (2011) für einen Beton im Bereich der Festigkeitsklassen C70/85 und C80/95, vgl. Wefer (2010). Die Abminderung infolge α_{fat} steigt bei beiden Ansätzen für höhere Betondruckfestigkeiten überproportional an, vgl. Bild 3. Es ist bisher nicht belegt, ob diese überproportionale Festigkeitsabminderung für zunehmende Betonfestigkeiten gerechtfertigt ist.

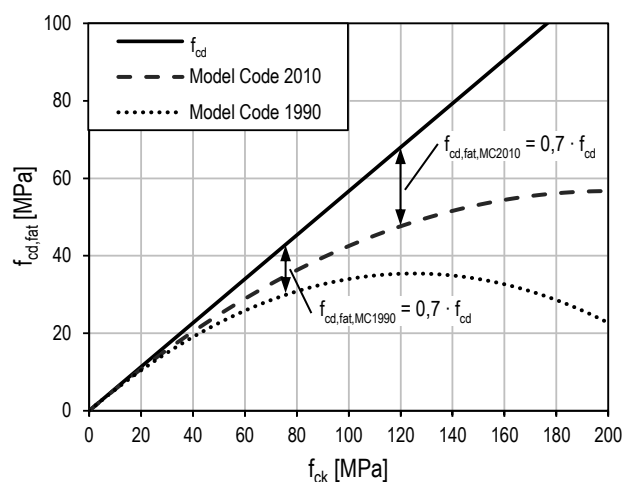


Bild 3: Bemessungswert der Druckfestigkeit bei Ermüdungsbeanspruchung $f_{cd,fat}$ nach Model Code 1990 (FIB 1993) bzw. DIN EN 1992-1-1 (2011) und Model Code 2010 (FIB 2013)

Der Bemessungswert $f_{cd,fat}$ beeinflusst die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der Ermüdungsbemessung erheblich. Neben der überproportionalen festigkeitsabhängigen Abminderung für steigende Betondruckfestigkeiten durch α_{fat} erklärt sich dieser Einfluss insbesondere durch die überproportionale Zunahme der Bruchlastwechselzahlen für niedrigere bezogene Oberspannungen. In eigenen Untersuchungen wurde dieser Zusammenhang anhand von Ermüdungsnachweisen an einem Spannbetonschaft (C90/105 mit einer ermüdungswirksamen Erstbelastung zum Zeitpunkt $t_0 = 84$ Tage) unter Ansatz des Bemessungswerts der Ermüdungsfestigkeit $f_{cd,fat}$ nach Model Code 1990 (FIB 1993) und Model Code 2010 (FIB 2013) veranschaulicht. Der um etwa 21 % höhere Bemessungswert $f_{cd,fat}$ nach Model Code 2010 (FIB 2013) gegenüber dem Ansatz nach Model Code 1990 (FIB 1993) führt bei Ansatz der zugehörigen Wöhlerlinien zu signifikant abweichenden Schädigungen. Für den untersuchten Anwendungsfall beträgt die rechnerische Gesamtschädigung nach Model Code 1990 (FIB 1993) etwa 89 % wohingegen der Ansatz nach Model Code 2010 (FIB 2013) rechnerisch zu keiner merklichen Schädigung führt. In Oneschkow & Lohaus (2017b) werden ähnliche Vergleichsrechnungen durchgeführt, die die hohen Abweichungen in den rechnerisch ertragbaren Bruchlastwechselzahlen bestätigen.

Die aufgeführten Ermüdungsnachweise enthalten darüber hinaus weitere (unbekannte) Sicherheiten: Die Auswirkungen hoher andauernder Ermüdungsbeanspruchungen mit unterschiedlicher Belastungsfrequenz werden derzeit durch eine Reduktion der Druckfestigkeit bei Ermüdungsbeanspruchung berücksichtigt ($k_1 \cdot \alpha_{cc} = 0,85$ bzw. $\beta_{c,sus}(t,t_0) = 0,85$); das Vorgehen und die Höhe des abmindernden Beiwerts sind dabei identisch zur statischen Bemessung. Anders als bei der Bemessungsdruckfestigkeit unter monoton steigender Beanspruchung (Grundlage der statischen Bemessung) wird bei Wöhlerlinien, die auf lang andauernden experimentellen Versuchen basieren, bereits das Dauerstandsverhalten anteilig berücksichtigt. Anstatt dieser mehrfachen Berücksichtigung des Dauerstandsverhaltens kann eine Anpassung des Dauerstandbeiwerts beispielsweise nach Rüschi (1972) über die Belastungsgeschwindigkeit erfolgen. Die in Rüschi (1972) enthaltenen Grenzkurven für das Versagen bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten basieren auf Untersuchungen unter monoton steigender Beanspruchung. Eine weitere Sicherheit beinhaltet die von der Betondruckfestigkeit abhängige Festigkeitssteigerung während der Nutzungsdauer von ermüdungsbeanspruchten Bauwerken. Aktuelle Regelwerke berücksichtigen die Festigkeit zu Beginn der Ermüdungsbeanspruchung. Ob die Berücksichtigung einer zeitabhängigen Festigkeit bis zum (rechnerischen) Ermüdungsversagen einen positiven Effekt auf die Bruchlastwechselzahl hat, ist bisher nicht geklärt. Weitere Faktoren, die die Sicherheit im Ermüdungsnachweis beeinflussen, sind u. a. in Grünberg et al. (2010) und König & Danielewicz (1994) aufgeführt. Insgesamt führen die aus Untersuchungen unter monoton steigender Beanspruchung abgeleiteten Sicherheitselemente und die darüber hinaus im Ermüdungsnachweis enthaltenen Sicherheiten zu einem unbekanntem Sicherheitsniveau im Ermüdungsnachweis von druckschwellbeanspruchtem Beton. Dabei beeinflussen die enthaltenen Beiwerte und Sicherheitselemente des Ermüdungsnachweises das Bemessungsergebnis deutlich stärker als der Sicherheitsbeiwert der Widerstandsseite bei der statischen Bemessung.

3 STOCHASTISCHE AUSWERTUNG DER ERMÜDUNGSFESTIGKEIT AN EINEM ULTRA-HOCHFESTEN BETON

Die Wahrscheinlichkeit eines Ermüdungsversagens kann für eine definierte Ober- und Unterspannung aus der statistischen Verteilung von experimentell bestimmten Bruchlastwechselzahlen abgeschätzt werden. Dies wurde beispielhaft in Schmidt et al. (2019) für experimentelle Ermüdungsuntersuchungen an normalfesten Betonen von Holmen (1979), Klausen (1978) und Weigler & Freitag (1971) sowie

einem hochfesten Beton aus Oneschkow (2014) durchgeführt. Dabei entsprechen die Quantilwerte der statistischen Verteilung den betrachteten Bruchlastwechselzahlen eines Spannungsniveaus und die zugehörigen Quantile den Aufttrittswahrscheinlichkeiten dieser Bruchlastwechselzahlen. Bei den aus Versuchsergebnissen abgeleiteten Wöhlerlinien aus den eingangs genannten Regelwerken erfolgte die statistische Auswertung der Bruchlastwechselzahlen dagegen ohne Kenntnis der Verteilungen bzw. beruht auf der Annahme, dass die Streuung der Bruchlastwechselzahlen ausschließlich in der Streuung der Druckfestigkeit unter monoton steigender Beanspruchung begründet ist.

Das in Schmidt et al. (2019) dargestellte Vorgehen zur stochastischen Auswertung von Bruchlastwechselzahlen soll hier exemplarisch auf Ergebnisse von experimentellen Ermüdungsuntersuchungen von Wefer (2010) angewendet werden, die Grundlage der Wöhlerlinien des Model Code 2010 (FIB 2013) sind. Durch den Vergleich der stochastisch bestimmten Bruchlastwechselzahlen einer definierten Aufttrittswahrscheinlichkeit mit den zugehörigen Wöhlerlinien soll die Sicherheit in aktuellen Nachweis-konzepten qualitativ bewertet werden.

Für die statistische Auswertung werden ausschließlich Untersuchungen aus Wefer (2010) mit einer bezogenen Unterspannung von $S_{\min} = 0,05$ betrachtet. In Tabelle 1 ist eine Übersicht über wesentliche Versuchsrandbedingungen aufgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Versuchsrandbedingungen ist in Wefer (2010) aufgeführt.

Tabelle 1: Versuchsrandbedingungen von Ermüdungsuntersuchungen aus Wefer (2010)

| Rezeptur | f_{cm} [MPa] | f_p [Hz] | Anzahl [-] | S_{\max} [-] | S_{\min} [-] |
|-----------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|
| 3 | | | 10 | 0,90 | |
| 3 | | | 10 | 0,80 | |
| 4 | | | 6 | 0,80 | |
| 4 | | | 6 | 0,70 | |
| 2 ^{A)} | | | 13 | 0,90 | |
| 1 ^{A)} | 185 | 10 | 4 | 0,90 | 0,05 |
| 2 ^{A)} | | | 4 | 0,85 | |
| 1 ^{A)} | | | 15 | 0,80 | |
| 2 ^{A)} | | | 16 | 0,80 | |
| 2 ^{A)} | | | 5 | 0,75 | |
| 2 ^{A)} | | | 13 | 0,70 | |

^{A)} Rezeptur mit Stahlfasern

Die statistische Auswertung der Bruchlastwechselzahlen erfolgt für die in Tabelle 1 aufgeführten bezogenen Oberspannungen S_{\max} . Es wird angenommen, dass die Bruchlastwechselzahlen logarithmisch normalverteilt sind, siehe Gl. (2).

$$F_X(N) = \Phi\left(\frac{\ln N - m_u}{\sigma_u}\right) \quad (2)$$

Die Verteilungsparameter m_u und σ_u werden mit der Momentenmethode geschätzt, siehe Gl. (3) und (4). Die Verteilungsparameter ergeben sich aus den Mittelwerten m_N und Standardabweichungen σ_N der Bruchlastwechselzahlen auf den betrachteten Spannungsniveaus. Dabei ist v_N der Variationskoeffizient nach Gl. (5).

$$m_u = \ln m_N - \frac{\sigma_u^2}{2} \quad (3)$$

$$\alpha_u = \sqrt{\ln(1 + v_N^2)} \quad (4)$$

$$v_N = \frac{\sigma_N}{m_N} \quad (5)$$

Die Bruchlastwechselzahlen für definierte Auftretswahrscheinlichkeiten ergeben sich aus der Inversen der in Gl. (2) dargestellten Verteilungsfunktion für beliebige Quantile. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die so stochastisch bestimmten Bruchlastwechselzahlen nach Wefer (2010) für eine Auftretswahrscheinlichkeit von $P = 0,5$ logarithmiert dargestellt. Hierzu wurden die Ermüdungswiderstände von vier unterschiedlichen Betonrezepturen mit einer mittleren Druckfestigkeit von $f_{cm} = 185,00$ MPa ausgewertet. Die Rezepturen 1 und 2 (Rez. 1 und Rez. 2 in Bild 4) enthalten Stahlfasern, wohingegen die Rezepturen 3 und 4 (Rez. 3 und Rez. 4 in Bild 4) keine Fasern enthalten. Die abgebildete Regressionsgerade wurde mit der Methode kleinster Fehlerquadrate bestimmt und stellt eine S-N-P-Linie für eine bezogene Unterspannung von $S_{min} = 0,05$ für die untersuchten Betone dar.

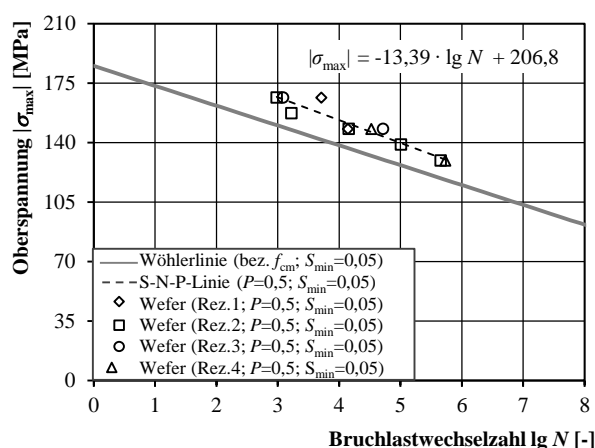


Bild 4: S-N-P-Linie auf Grundlage von experimentell ermittelten Ermüdungsfestigkeiten von Wefer (2010) für $P = 0,5$ und $S_{min} = 0,05$ im Vergleich zu entsprechenden Wöhlerlinien nach Model Code 2010 (FIB 2013)

Die dargestellte gestrichelte S-N-P-Linie für eine Auftretswahrscheinlichkeit von $P = 0,5$ sollte demzufolge etwa einer Wöhlerlinie entsprechen, die eine Unterspannung von $|\sigma_{min}| = 9,25$ MPa aufweist und bei einer Oberspannung von $|\sigma_{max}| = 185,00$ MPa rechnerisch einen Lastwechsel erträgt. Die S-N-P-Linie in Bild 4 liegt leicht oberhalb der zugehörigen Wöhlerlinie, d. h. die Wöhlerlinie nach Model Code 2010 (FIB 2013) bestätigt auf der sicheren Seite liegend die Versuchsergebnisse von Wefer (2010) für den Bruchlastwechselzahlbereich $\lg N = 3$ bis etwa $\lg N = 5,8$, sofern die mittlere Druckfestigkeit f_{cm} als Bezugswert angesetzt wird.

Die in dem Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit $f_{cd,fat}$ enthaltenen Sicherheiten führen zu einer deutlichen Absenkung der Bemessungswöhlerlinie gegenüber einer Wöhlerlinie, deren Ober- und Unterspannungen wie in Bild 4 auf den Mittelwert der Druckfestigkeit f_{cm} bezogen werden. Ob die Absenkung dem angestrebten Sicherheitsniveau entspricht, lässt sich näherungsweise durch einen Vergleich mit den zugehörigen S-N-P-Linien überprüfen. Nach Holmen (1979) resultiert die Streuung der

Bruchlastwechselzahlen aus der Streuung der Druckfestigkeit unter monoton steigender Beanspruchung. Demzufolge sollte eine Bemessungswöhlerlinie, deren Ober- und Unterspannungen auf die charakteristische Druckfestigkeit f_{ck} bezogen werden, näherungsweise mit einer S-N-P-Linie mit einer Auftretswahrscheinlichkeit von $P = 0,05$ übereinstimmen. Beziehungswise sollte ausgehend von einem identischen Zielzuverlässigkeitsniveau wie in der statischen Bemessung die Bemessungswöhlerlinie mit $f_{cd,fat}$ als Bezugswert etwa einer S-N-P-Linie mit einer Auftretswahrscheinlichkeit von $P = 10^{-6}$ entsprechen. Die operative Versagenswahrscheinlichkeit $P = 10^{-6}$ entspricht einem Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 4,7$ für einen Bezugszeitraum von einem Jahr und damit der empfohlenen Zielzuverlässigkeit eines Hochbaus der Zuverlässigkeitsklasse RC 2 nach DIN EN 1990 (DIN 2010). In den Bildern 5 und 6 werden die Bemessungswöhlerlinien und die zugehörigen S-N-P-Linien vergleichend dargestellt, wobei zu beachten ist, dass die Unterspannung konstant zu $|\sigma_{min}| = 9,25$ MPa angenommen wird, was $S_{min} = 0,05$ bei Ansatz der mittleren Druckfestigkeit $f_{cm} = 185$ MPa unter monoton steigender Beanspruchung als Bezugswert entspricht. In den dargestellten Wöhlerdiagrammen kommt es zu einer Erhöhung von S_{min} , da die Bezugswerte f_{ck} und $f_{cd,fat,MC2010}$ kleiner als die mittlere Druckfestigkeit unter monoton steigender Beanspruchung sind. Ein direkter Vergleich der Bemessungswöhlerlinien mit den aufgeführten S-N-P-Linien ist daher nicht möglich. Die dargestellten Vergleiche zeigen jedoch eine deutliche Tendenz für abnehmende Bezugswerte.

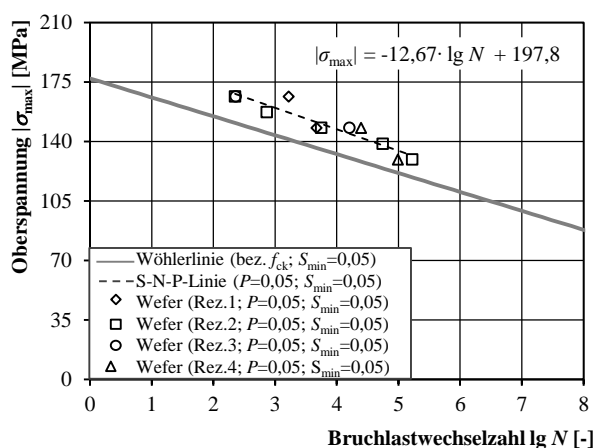


Bild 5: S-N-P-Linie auf Grundlage von experimentell ermittelten Ermüdungsfestigkeiten von Wefer (2010) für $P = 0,05$ und $S_{min} = 0,05$ im Vergleich zu entsprechenden Wöhlerlinien nach Model Code 2010 (FIB 2013)

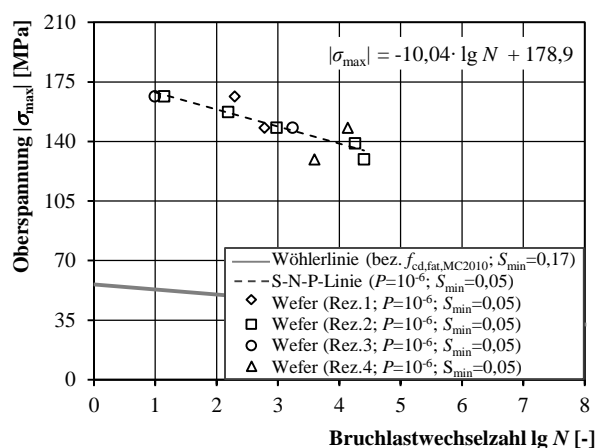


Bild 6: S-N-P-Linie auf Grundlage von experimentell ermittelten Ermüdungsfestigkeiten von Wefer (2010) für $P = 10^{-6}$ und $S_{min} = 0,05$ im Vergleich zu entsprechenden Wöhlerlinien nach Model Code 2010 (FIB 2013)

Die Bemessungswöhlerlinien verlaufen aufgrund der niedrigeren Bezugswerte f_{ck} und $f_{cd,fat,MC2010}$ gegenüber Bild 4 vertikal in Richtung niedriger Oberspannungen versetzt. Auch ist in beiden Diagrammen erwartungsgemäß ein horizontaler Versatz der S-N-P-Linien für abnehmende P in Richtung abnehmender Bruchlastwechselzahlen zu erkennen, wobei die S-N-P-Linien stets oberhalb der zugehörigen Wöhlerlinien liegen. Während in Bild 5 die Bemessungswöhlerlinie und die zugehörige S-N-P-Linie lediglich geringfügig stärker voneinander abweichen als in Bild 4 bei einem Bezugswert f_{cm} , ist in Bild 6 trotz nominal gleicher Auftretswahrscheinlichkeit ein deutlicher Versatz zwischen beiden Geraden zu erkennen. Das bedeutet durch den Bemessungswert der Betondruckfestigkeit unter Ermüdungsbeanspruchung $f_{cd,fat}$ wird nach Model Code 2010 (FIB 2013) eine operative Versagenswahrscheinlichkeit geschaffen, die deutlich unterhalb der stochastisch bestimmten Versagenswahrscheinlichkeit aus den untersuchten Ermüdungsfestigkeiten an ultra-hochfesten Betonen liegt. Unter der Annahme, dass die

Zielzuverlässigkeit für druckschwellbeanspruchten Beton der Zielzuverlässigkeit unter monoton steigender Beanspruchung entsprechen soll, sind die Bemessungswöhlerlinien nach Model Code 2010 (FIB 2013) verglichen mit den dargestellten zugehörigen S-N-P-Linien sehr konservativ.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Die erforderliche Sicherheit gegen ein Ermüdungsversagen von druckschwellbeanspruchtem Beton wird in aktuellen Nachweiskonzepten durch die Reduktion der Bezugsdruckfestigkeit gewährleistet. Die verwendeten Sicherheitselemente entstammen der statischen Bemessung und werden unterschiedlichen ermüdungswiderstandsmindernden Einflüssen zugeschrieben. Darüber hinaus hat aufgrund der einfachlogarithmischen Beschreibung der Wöhlerlinien eine geringe Änderung der Bezugsdruckfestigkeit eine überproportionale Auswirkung auf den Ermüdungswiderstand. Das tatsächliche Sicherheitsniveau des Ermüdungsnachweises ist damit unklar. Zusätzlich existieren weitere wesentliche Einflussfaktoren wie die Bauteilfeuchte und die Bauteiltemperatur, die im derzeitigen Ermüdungsnachweiskonzept unberücksichtigt bleiben. Innerhalb von Biegebauteilen führen Ermüdungsbeanspruchungen zu Spannungsumlagerungen, die bei einem Ermüdungsnachweis an der reinen Bauteilrandfaser zu konservativen Ergebnissen führen. In diesem Beitrag werden Ergebnisse von stochastischen Auswertungen der Bruchlastwechselzahlen von ultra-hochfesten Betonen mit Bemessungswöhlerlinien nach Model Code 2010 (FIB 2013) qualitativ verglichen. Die S-N-P-Linien auf Basis von bestehenden Ergebnissen von Ermüdungsversuchen deuten im Vergleich zur statischen Bemessung auf ein höheres Sicherheitsniveau des Ermüdungswiderstands hin. Diese Betrachtungen zeigen das Weiterentwicklungspotenzial des Nachweiskonzepts gegen Ermüdung von druckschwellbeanspruchtem Beton.

LITERATUR

- Aas-Jacobsen, K. (1970) Fatigue of concrete beams and columns. University of Trondheim.
- Danielewicz, I. (1994) Zur Ermüdungsbemessung von Beton-Straßenbrücken. Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Technische Hochschule Darmstadt.
- DIN EN 1990 (DIN 2010) Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Eurocode 0 - Grundlagen der Tragwerksplanung. (12.2010).
- DIN EN 1992-1-1 (DIN 2011) Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Eurocode 2 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. 13.04.2012 (01.2011).
- Grünberg, J.; Ertel, C.; Lohaus, L.; Wefer, M.; Curbach, M.; Speck, K.; Niedermeier, R.; Fitik, B. (2010): Failure Models for Ultra High Performance Concrete (UHPC). 3rd fib International Congress, June 2010, Washington DC.
- Hohberg, R. (2004) Zum Ermüdungsverhalten von Beton. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Holmen, J. O. (1979) Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading. Dissertation, University of Trondheim.

- Hsu, T. T. C. (1981) Fatigue of Plain Concrete. *ACI Materials Journal* 78 (1981), S. 292-305.
- Klausen, D. (1978) Festigkeit und Schädigung von Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.
- Klausen, D.; Weigler, H. (1979) Betonfestigkeit bei konstanter und veränderlicher Dauerschwellbeanspruchung. *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, S. 158–163.
- König, G., Danielewicz, I. (1994) Ermüdungsfestigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen mit Erläuterungen zu den Nachweisen gemäß CEB-FIP Model Code 1990. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 439, Beuth, Berlin.
- Lohaus, L.; Oneschkow, N.; Wefer, M. (2012) Design model for the fatigue behaviour of normal-strength, high-strength and ultra-high-strength concrete. *Structural Concrete* 13 (2012), Heft 3, S. 182-192.
- Mc Call, J. T. (1958) Probability of Fatigue Failure of Plain Concrete. *ACI-Journal*, S. 233-240.
- Model Code 1990 (FIB 1993) Comité Euro – International du Béton (Hrsg.): CEB-FIP Model Code 1990. Lausanne (1993).
- Model Code 2010 (FIB 2013) Fédération internationale du béton (Hrsg.): fib Model Code for concrete structures 2010. Berlin (2013).
- Oh, B. H. (1991) Fatigue-Life Distributions of Concrete for Various Stress Levels. *ACI Materials Journal* 88 (1991), Heft 2, S. 122-128.
- Oneschkow, N. (2014) Analyse des Ermüdungsverhaltens von Beton anhand der Dehnungsentwicklung. Dissertation, Leibniz Universität Hannover.
- Oneschkow, N.; Lohaus, L. (2017): Zum Ermüdungsnachweis von druckschwellbeanspruchtem Beton – Teil 2: Sicherheitsüberlegungen und Potential für Weiterentwicklungen. *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017), Heft 9, S. 611-622.
- Petković, G.; Stemland, H.; Rosseland, S. (1992) High Strength Concrete SP 3 – Fatigue, Re-port 3.2: Fatigue of High Strength Concrete. SINTEF Structural Engineering – FCB, Trondheim.
- Rüsch, H. (1972): *Stahlbeton – Spannbeton*, Band 1: Werkstoffeigenschaften und Bemessungsverfahren. Werner-Verlag, Düsseldorf.
- Schmidt, B.; Schneider, S.; Marx, S. (2019) Betonermüdung - Sicherheiten und Entwicklungspotenziale aktueller Nachweiskonzepte. *Bautechnik* 96 (2019), Heft 4, S. 329-337, Ernst & Sohn.
- Tepfers, R.; Kutti, T. (1979) Fatigue strength of plain, ordinary, and lightweight concrete. *ACI Journal*.

von der Haar, C. (2017) Ein mechanisch basiertes Dehnungsmodell für ermüdungsbeanspruchten Beton. Dissertation.

Wefer, M. (2010) Materialverhalten und Bemessungswerte von ultrahochfestem Beton unter einaxialer Ermüdungsbeanspruchung. Dissertation. Leibniz Universität Hannover.

Weigler, H.; Freitag, W. (1971) Dauerschwell- und Betriebsfestigkeit von Konstruktionsleichtbeton [Forschungsbericht]. Technische Hochschule Darmstadt, Institut für Massivbau.