

Einfluss der Gesteinskörnung auf die Ermüdungsschädigung in hochfestem Beton

Tim Scheiden¹, Nadja Oneschkow¹, Ludger Lohaus¹

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

KURZFASSUNG:

In diesem Beitrag wird der Einfluss der groben Gesteinskörnungsart auf das Ermüdungsverhalten von hochfesten Betonen analysiert, beschrieben und vergleichend dargestellt. Dabei werden zwei hochfeste Betone mit Basalt und Granit als Grobzuschlag auf zwei Spannungsniveaus, $S_{c,max} = 0,85$ und $S_{c,max} = 0,70$, untersucht. Mit Hilfe der Schallemissionsanalyse und mit detaillierten Dehnungsmessungen werden die ablaufenden Schädigungsprozesse erfasst und anhand von Schädigungsindikatoren wie Steifigkeitsdegradation, dissipierte Energie je Lastwechsel und Schallemissionsaktivität ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen dabei signifikante Unterschiede in den ablaufenden Degradationsmechanismen, aufgrund der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Gesteinskörnung auf und geben Hinweise auf generelle ermüdungsbedingte Schädigungsprozesse im Betongefüge.

ABSTRACT:

In this paper the influence of the coarse aggregate type on the fatigue behaviour of high-strength concrete is analyzed, described and compared comparatively. Two high-strength concretes with basalt and granite as coarse aggregate with two different stress levels, $S_{c,max} = 0.85$ and $S_{c,max} = 0.70$ were investigated. With the acoustic emission analysis and detailed strain measurements, the ongoing damage processes were determined and evaluated on the basis of damage indicators such as stiffness degradation, dissipated energy per load cycle and acoustic emission activity. The results show significant differences in the ongoing damage mechanisms due to the different mechanical properties of the coarse aggregate and give indicators of general fatigue related damage processes in the concrete structure.

1 EINLEITUNG

In den vergangenen Jahrzehnten wurden eine große Anzahl von Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Betonen unterschiedlicher Druckfestigkeit durchgeführt. Das primäre Ziel dieser Untersuchungen war es, S-N-Kurven zu entwickeln bzw. zu bestätigen, welche die Grundlage des aktuellen Ermüdungsnachweises in verschiedenen Regelwerken, wie z. B. dem Model Code (fib, 2013) oder Eurocode (GIS, 2011), bilden. In diesen Regelwerken werden die S/N-Kurven für alle Druckfestigkeiten, w/z-Werte, Gesteinskörnungsarten und -sieblinien in gleicher Weise ohne Unterscheidung angesetzt. Hinsichtlich der S-N-Kurven wird aktuell darüber diskutiert, ob sie die Anzahl der Belastungszyklen bis zum Versagen hochfester Betone in ausreichender Weise abbilden (Oneschkow et al., 2017a). Neben den S/N-Kurven geht der Bemessungswert für die Betondruckfestigkeit $f_{cd,fat}$ entscheidend in den Ermüdungsnachweis ein. Er enthält einen Abminderungsfaktor, der überproportional zur Festigkeit ansteigt, so dass folglich höhere Festigkeiten der Betone bei der Ermüdungsbemessung nicht vollumfänglich ausgenutzt werden können. Bezüglich der erforderlichen Höhe der Abminderung des Bemessungswertes für die Betondruckfestigkeit $f_{cd,fat}$ wird nach wie vor über den Faktor der Reduktion diskutiert (Oneschkow et al., 2017b). Zur Klärung der offenen Fragen ist es zwingend erforderlich, die ablaufenden Schädigungsmechanismen besser zu verstehen. Bei den bisherigen Untersuchungen fällt auf, dass Schädigungsindikatoren, wie bspw. die Dehnung oder die Steifigkeit oftmals nicht betrachtet wurden (Holmen, 1979; Oneschkow, 2014; Oneschkow, 2016; Petković, 1991; Wefer, 2010), sondern lediglich die Erfassung von Bruchlastwechselzahlen im Fokus stand. Folglich ist nur wenig über die ablaufenden Schädigungsmechanismen im Mikrogefüge des Betons durch zyklische Druckschwellbeanspruchung bekannt.

Durch die Entwicklung von Betonen mit immer größerer Druckfestigkeit und der Konstruktion schlanker Tragwerke mit hochzyklischer Belastung wird das Ermüdungsverhalten jedoch maßgebend für das Tragwerksdesign und die Bemessung. Daher ist eine Anpassung des Ermüdungsnachweises unbedingt erforderlich, um eine sichere und gleichzeitig wirtschaftliche Bemessung von hochzyklisch belasteten Tragwerken zu ermöglichen. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 2020 „Zyklische Schädigungsprozesse in hochfesten Betonen im Experimental-Virtual-Lab“ soll das Verständnis um die Ermüdungsschädigung von hochfesten Betonen grundlegend erweitert werden.

In der Literatur sind diverse Untersuchungen hinterlegt, die die Rissentwicklung aufgrund von Ermüdungsbeanspruchungen dokumentieren. Einzelne Untersuchungen beobachteten eine ermüdungsinduzierte Rissbildung in der ITZ (interfacial transition zone) zwischen grober Gesteinskörnung und dem Zementstein (Lloyd et al., 1968). Weitere Ergebnisse deuten auf den Einfluss bereits vorhandener Mikrorisse im Zementstein hin, die sich infolge der Ermüdungsbeanspruchung vergrößern und zu Makrorissen zusammenschließen. Weitere Untersuchungen beobachteten in Abhängigkeit vom Beanspruchungsniveau vorwiegend die Bildung neuer Mikrorisse. (Lee et al., 2004; Ibuk et al., 2010).

Offensichtlich beeinflusst die Mikrostruktur des Betons und daher auch seine Zusammensetzung, die Entstehung und Fortsetzung der Gefügeschädigung unter Ermüdungsbeanspruchung. Hinsichtlich des Einflusses des Betongefüges aufgrund variierender Betonzusammensetzungen sind jedoch nur wenig grundlagenbasierte Erkenntnisse dokumentiert.

(Breitenbücher et al, 2008) und (Ibuk, 2010) berichten über Ermüdungsversuche unter Druckschwellbeanspruchung an normalfesten Betonen mit drei unterschiedlichen Gesteinskörnungen

(Basalt, Quarzit und Sandstein). Sie fanden eine zunehmende Sensibilität der Betone gegenüber Ermüdung mit steigendem Unterschied zwischen den Steifigkeiten des Zementsteins und der Gesteinskörnung. Ein stärkerer Abfall der Steifigkeit bei der Ermüdung und einhergehende breitere Rissweiten konnten beobachtet werden. Im Gegensatz dazu konnten von (Hordijk et al., 1995) keine Unterschiede in den Bruchlastwechselzahlen eines hochfesten Betons mit Kalkstein oder mit Quarzkies festgestellt werden.

Das Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen ist es, den Einfluss der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Gesteinskörnung auf die Schädigungsmechanismen eines hochfesten Betons unter Druckschwellbeanspruchung, auf Basis von Schädigungsindikatoren und daraus abgeleiteten Schädigungsparametern, zu analysieren und zu beschreiben. Dabei liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen nicht in der Vorhersage von Bruchlastwechselzahlen, sondern darin, ein besseres Verständnis hinsichtlich der Gefügeschädigung sowie der Schädigungsmechanismen zu erlangen. In einem ersten Schritt wird der Einfluss grober Gesteinskörnungen unterschiedlicher Steifigkeit in zwei hochfesten Betonen untersucht. Der erste Beton, der auch als Referenzbeton innerhalb des SPP 2020 verwendet wird, enthält Gesteinskörnung aus Basalt und der zweite aus Granit. Ermüdungsversuche unter Druckschwellbeanspruchung werden vergleichend durchgeführt und die Ergebnisse hinsichtlich der Entwicklungen der Dehnung, der Steifigkeit, der dissipierten Energie und Schallemission ausgewertet. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der Ermüdungsversuche bis zum Versagen vergleichend vorgestellt.

2 VERSUCHSPROGRAMM

2.1 Betone und Probekörper

Die experimentellen Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten unter einaxialer Druckbelastung wurden an zwei unterschiedlichen hochfesten Betonen mit unterschiedlicher Gesteinskörnung durchgeführt. Hierfür wurde basierend auf dem SPP-Referenzbeton mit Basalt RH1-B die Gesteinskörnung durch eine Körnung aus Granit mit gleicher Korngrößenverteilung ersetzt (Beton RH1-G). Zur Gewährleistung vergleichbarer Frischbetoneigenschaften waren für den Granitbeton RH1-G keine Anpassungen der Zusatzstoffe erforderlich. Voruntersuchungen zeigten weiterhin, dass das Verhältnis des Leimvolumen zum Volumen der Gesteinskörnung, V_p/V_g , sich nicht signifikant änderte. Die Zusammensetzung des Referenzbetons mit Basalt RH1-B und des Betons mit Granit RH1-G ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Betonzusammensetzung

Zement (CEM I 52,5 R HS/NA)	kg/m ³	500
Quartzsand (0/0,5mm)	kg/m ³	75
Sand (0/2mm)	kg/m ³	850
Basalt/Granit (2/5mm)	kg/m ³	350
Basalt/Granit (5/8mm)	kg/m ³	570
PCE Fließmittel	kg/m ³	5,00
Stabilisierer	kg/m ³	2,85
Wasser	kg/m ³	176

Die mittlere Druckfestigkeit nach 28 Tagen und Unterwasserlagerung betrug $f_{ck,cube} = 113 \text{ N/mm}^2$ für den RH1-B und $f_{ck,cube} = 109 \text{ N/mm}^2$ für den RH1-G. Folglich besteht nur ein vernachlässigbar geringer Unterschied zwischen den Druckfestigkeiten beider Betonmischungen.

Die Ermüdungsversuche wurden an zylindrischen Probekörpern mit einem Verhältnis von $h/d = 180/60$ mm durchgeführt. Die PVC-Schalungen wurden in einem Alter von sieben Tagen entfernt und die Zylinder anschließend im Referenzklima ($20^{\circ}\text{C}/65\%$ r.F.) bis zur Prüfung gelagert. Die Oberflächen der Probekörper wurden planparallel geschliffen und poliert, um eine gleichmäßige Lasteinleitung zu gewährleisten.

2.2 Versuchsaufbau

Die experimentellen Untersuchungen erfolgten kraftgesteuert in einer servo-hydraulischen Prüfmaschine mit einem 500 kN Belastungsaktuator. Für die Ermüdungsversuche wurden je Belastungsregime drei Probekörper mit einem Mindestalter von 56 Tagen untersucht. Zunächst wurde die axiale Belastung monoton bis zur angestrebten mittleren Spannung gesteigert. Anschließend wurde die volle sinusförmige Spannungsamplitude bereits ab dem ersten Zyklus mit einer Belastungsfrequenz von $f_p = 1,0$ Hz. aufgebracht. Die Unterspannung wurde in allen Versuchen konstant bei $S_{c,\min} = 0,05$ gehalten, während die Oberspannung auf zwei Niveaus, $S_{c,\max} = 0,85$ oder $S_{c,\max} = 0,70$, eingestellt wurde. Die statische Druckfestigkeit der hochfesten Betone wurde unmittelbar vor den Ermüdungsversuchen an fünf Probekörpern gleicher Geometrie, die aus der gleichen Charge stammten, ermittelt, wobei als Referenzdruckfestigkeit für die Ermüdungsversuche der Mittelwert der zugehörigen statischen Druckfestigkeit verwendet wurde.

Die axialen Verformungen wurden während der Untersuchungen kontinuierlich mit drei Laserdistanzsensoren, die um den Probekörper bei 0° , 120° und 240° platziert wurden, gemessen. Zusätzlich wurden die Axialkraft und der Axialhub des Aktuators, die Oberflächentemperatur der Probe in Probenmitte, die Temperatur der Kalotte und die Umgebungstemperatur gemessen. Die Messrate betrug 300 Hz. Für die Messungen der Schallemissionen während der Ermüdungsversuche wurden sechs Sensoren am Probekörper befestigt. Die Sensoren hatten eine Messfrequenz zwischen 250 – 1.600 Hz und wurden in 60° -Abständen zueinander alternierend im oberen und unteren Drittel der Probenhöhe platziert. Induktive Wegaufnehmer (LVDT) und Dehnmessstreifen wurden zusätzlich verwendet, um die Probenverformungen zu messen. Der Versuchsaufbau ist in Bild 1 dargestellt.

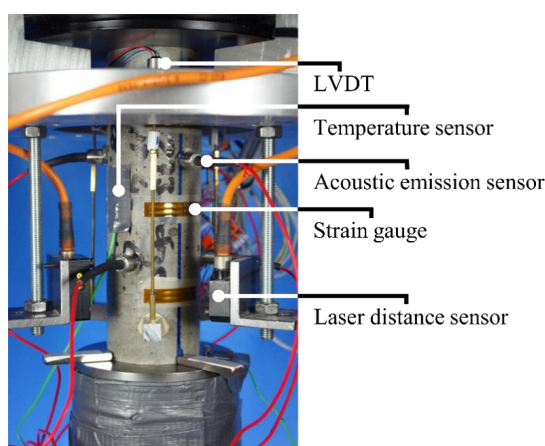


Bild 1: Versuchsaufbau, nach [Scheiden et al., 2019]

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Bruchlastwechselzahl

Der maximale Temperaturanstieg während der Ermüdungsversuche betrug 12 K und war damit recht gering. Bei höheren Prüffrequenzen und größeren Probekörperabmessungen wären deutlich höhere Temperaturanstiege während der Ermüdungsversuche zu erwarten gewesen, die möglicherweise das

Untersuchungsziel beeinflusst hätten. Die Korrelation zwischen der Oberspannung $S_{c,max}$ und der Anzahl der aufgetragenen Lastwechsel ist in Bild 2 dargestellt. Die Ergebnisse für beide Betonzusammensetzungen sind als Einzelwerte aus je drei Versuchen pro Spannungsniveau dargestellt.

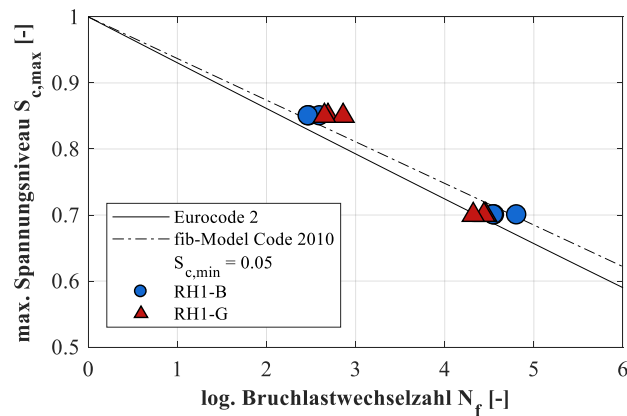


Bild 2: Bruchlastwechselzahl, nach [Scheiden et al., 2019]

Anhand von Bild 2 wird deutlich, dass die Streuung der Versuchsergebnisse auf beiden Spannungsniveaus und für beide Betonzusammensetzungen recht gering sind, im Vergleich zu den in der Literatur erwähnten Untersuchungsergebnissen (Holmen, 1979; Oneschkow, 2016; Petković, 1991; Huemme, 2018). Die Einzelwerte in beiden Spannungsniveaus für beide Betonzusammensetzungen überschneiden sich nicht. Die geringen Streuungen in den Versuchsergebnissen erlauben eine präzisere Auswertung hinsichtlich der Schädigungsmechanismen, die in diesen Untersuchungen im Vordergrund stehen (siehe Abschnitt 3.2).

Bei einer Oberspannung von $S_{c,max} = 0,85$ erreicht der Granit-Beton eine höhere Bruchlastwechselzahl als der Basalt-Beton. Im Vergleich dazu kehrt sich das Verhältnis der ertragbaren Lastwechselzahlen der Betone bei dem niedrigeren Oberspannungsniveau um. Hier erreicht der Granit-Beton geringere Bruchlastwechselzahlen als der Basalt-Beton. Dieses Verhalten wird anhand der Schädigungsindikatoren in den folgenden Abschnitten weiter untersucht.

Beide Betone erreichen die S-N-Kurven des Eurocode 2 (GIS, 2011) und fib Model Code 2010 (fib, 2013) für das höhere Spannungsniveau. Für $S_{c,max} = 0,70$ liegen die meisten Einzelwerte minimal unterhalb der S/N-Kurven des Model Code 2010. Im Mittel entsprechen jedoch beide Betone den S/N-Kurven des Eurocode 2. Insgesamt deuten die beobachteten Lastwechselzahlen der hochfesten Betone mit Basalt und Granit als Gesteinskörnung auf ein für hochfeste Betone repräsentatives Ermüdungsverhalten hin, sodass sie für die Ziele dieser Untersuchungen geeignet erscheinen.

3.2 Schädigungsindikatoren

Der Elastizitätsmodul nach DIN EN 12390-13 (GIS, 2014) und der Sekantenmodul der quasi-statischen Spannungs-Dehnungslinie wurden vor den Ermüdungsversuchen an jeweils drei Zylindern mit der Dimension 180/60 bestimmt. Der Granit-Beton RH1-G hat einen mittleren Elastizitätsmodul von 35.600 N/mm^2 . Dieser liegt um 12 % unterhalb des Elastizitätsmoduls des Basalt-Beton RH1-B mit 40.000 N/mm^2 . Der mittlere Sekantenmodul (Steifigkeit während der quasi-statischen Belastung) betrug 32.100 N/mm^2 für den RH1-B und 31.600 N/mm^2 für den RH1-G. Demnach besteht bei diesem Parameter kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Betonen.

Im Folgenden wird die Entwicklung der Schädigungsindikatoren der Dehnung bei Ober- und Unterspannung, der Sekantenmodul entlang des absteigenden Asts (Steifigkeit), die dissipierte Energie und die Schallemissionsaktivität für beide Betone hinsichtlich ihrer Entwicklung über den Verlauf der Ermüdungsbeanspruchung vergleichend ausgewertet. Die Dehnungsentwicklungen beinhalten den letzten Dehnungswert vor dem Versagen. Die Bruchdehnungen werden in den Auswertungen, aufgrund der unterschiedlichen Spannungsniveaus und der hohen Instabilität des Zustands der Mikrostruktur im Augenblick des Bruchs, nicht berücksichtigt. Die Steifigkeit E_s wurde für jeden Lastwechsel als Sekantenmodul zwischen den Maxima und Minima des Entlastungsgastes berechnet. Die dissipierte Energie pro Zyklus E_d wurde als Fläche der Hystereseschleife bestimmt. Die Hits der Schallemission sind als einzelne transiente Signale definiert. Basierend auf Voruntersuchungen wurde ein Schwellenwert von 40 db ermittelt, um Nutzsignale von Hintergrundgeräuschen zu trennen.

Die Entwicklung der Schädigungsindikatoren ist in Bild 3 und 4 exemplarisch für einen Probekörper jeder Betonzusammensetzung je Belastungsniveau dargestellt. In allen Probekörpern aus beiden Mischungen sind charakteristische Tendenzen der Schädigungsindikatoren zu beobachten. Die folgenden Schädigungsparameter wurden quantitativ ausgewertet.

ε^f	Bruchdehnung [‰]
$\Delta\varepsilon_{c,\max}^{0-1.0}$	Gesamtzunahme an Dehnung bei Oberspannung [‰]
$\Delta\varepsilon_{c,\min}^{0-1.0}$	Gesamtzunahme an Dehnung bei Unterspannung [‰]
$\text{grad}\varepsilon_{c,\max}^{\text{II}}$	Gradient der Dehnungsentwicklung bei Oberspannung in Phase II [-]
$\text{grad}\varepsilon_{c,\min}^{\text{II}}$	Gradient der Dehnungsentwicklung bei Unterspannung in Phase II [-]
ΔE_s	Prozentualer Steifigkeitsverlust [%]
$\text{grad} E_s^{\text{II}}$	Gradient der Steifigkeitsentwicklung in Phase II [MPa]
ΣE_D	kumulierte dissipierte Energie [MJ/m ³]
$\text{grad} E_D^{\text{II}}$	Gradient der Entwicklung der dissipierten Energie in Phase II [MJ/m ³]
Σn_H	kumulierte Anzahl an Hits [-]

Die Gesamtzunahme an Dehnung beschreibt die Dehnungszunahme vom Beginn der Ermüdungsbeanspruchung bis hin zum letzten Lastwechsel vor dem Bruch. Die Gradienten beschriebenen Parameter wurden mittels einfacher linearer Regression in Phase II des jeweiligen Parameters (Dehnung, Steifigkeit und dissipierte Energie) berechnet. Der prozentuale Verlust der Steifigkeit beschreibt den Gesamtverlust an Steifigkeit über den Ermüdungsprozess im Verhältnis zur anfänglichen Steifigkeit. Tabelle 2 enthält die Mittelwerte ausgewählter Parameter für beide Beanspruchungsniveaus zur Quantifizierung und allgemeinen Einordnung der Ergebnisse. Die Einzelwerte zeigen vergleichbare Tendenzen und nur geringe Abweichungen untereinander. Aus diesem Grund wurden die Mittelwerte für die weitere Auswertung verwendet.

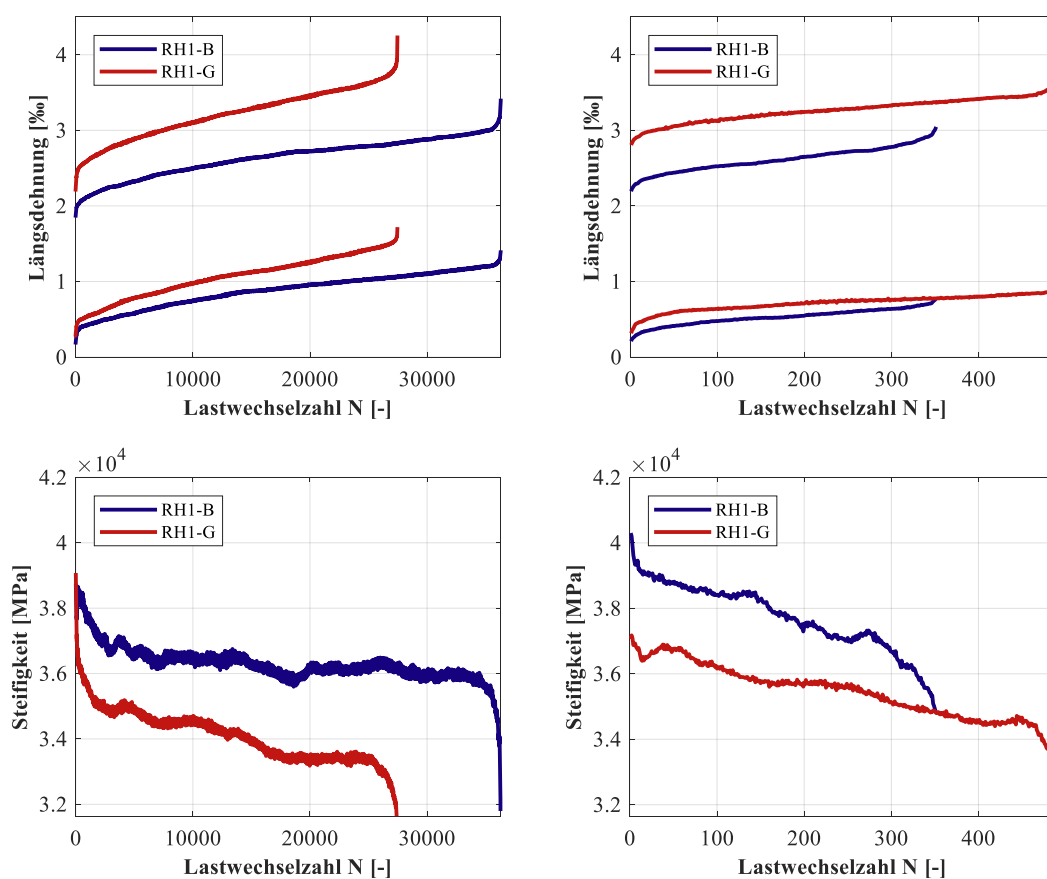


Bild 3: Entwicklung der Schädigungsindikatoren, Längsdehnung und Steifigkeit für $S_{c,max}=0,70$ (links) und $S_{c,max}=0,85$ (rechts), nach [Scheiden et al., 2019]

Die Entwicklungen der Dehnung und der Steifigkeit zeigen jeweils den charakteristischen dreiphasigen Verlauf auf (Holmen, 1979; Oneschkow, 2016). Dabei wird deutlich, dass der Granit-Beton über den gesamten Ermüdungsprozess hinaus aufgrund seiner geringeren Steifigkeit tendenziell höhere Dehnungen aufweist als der Basalt-Beton. Die Dehnung beim Versagen ist ebenfalls beim Granit-Beton bei beiden Beanspruchungsniveaus größer. Auch die Gesamtdehnung ist beim Granit-Beton größer, wobei der Unterschied bei der geringeren Oberspannung größer ist (vgl. Tabelle 2). Die berechneten Gradienten der Dehnungsentwicklung in Phase II bei $S_{c,max} = 0,70$ sind höher für den Granit-Beton im Vergleich zum Basalt-Beton, was eine größere Zunahme der Dehnung pro Lastwechsel bedeutet (vgl. Tabelle 2). Für das höhere Beanspruchungsniveau von $S_{c,max} = 0,85$ kehrt sich das Verhältnis der Gradienten um. Hier zeigt der Basalt-Beton geringfügig größere Dehnungsgradienten.

Trotz der relativ geringen Unterschiede bei den statischen E-Modulmessungen ist die Steifigkeit des Granit-Betons unabhängig vom Spannungsniveau erkennbar niedriger als die des Basalt-Betons. Der Steifigkeitsverlust pro Lastwechsel in Phase II für $S_{c,max} = 0,70$ ist beim Granit-Beton deutlich höher, was anhand des Gradienten deutlich wird. Ähnlich zur Dehnungsentwicklung ändert sich beim höheren Spannungsniveau auch das Verhältnis der Steifigkeiten zwischen den beiden Betonen. Hier ist der Gradient der Steifigkeit für den Granit-Beton geringer, was einem geringeren Steifigkeitsverlust pro Lastwechsel entspricht. Passend zum Gradienten der Steifigkeit ist der prozentuale Verlust an Steifigkeit des Granit-Betons für $S_{c,max} = 0,70$ höher und für $S_{c,max} = 0,85$ im Vergleich zum Basalt-Beton niedriger. Bezüglich der Ergebnisse von (Breitenbücher et al., 2008) und

(Ibuk, 2010) sind weitere Untersuchungen zur Steifigkeit der individuellen Feststoffphasen erforderlich, um den Schädigungsmechanismus zu charakterisieren und den Spannungsverlauf innerhalb des Betons zu beschreiben.

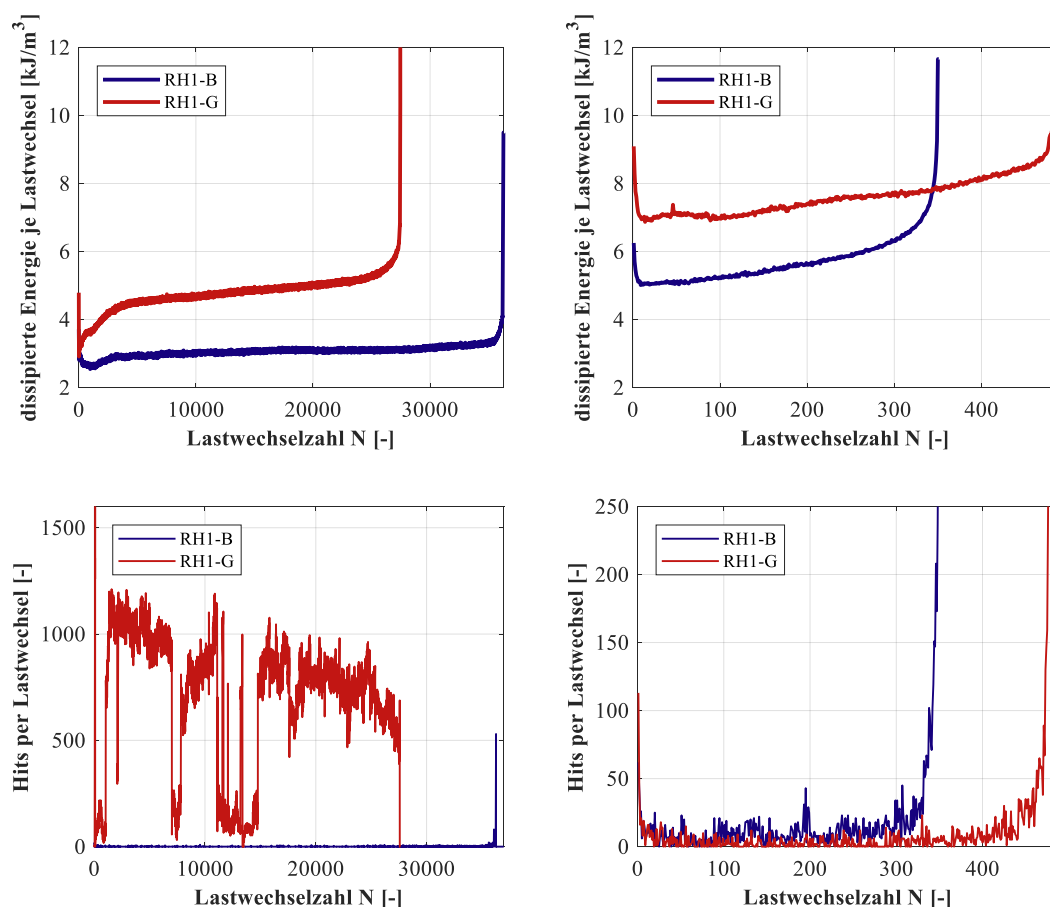


Bild 4: Entwicklung der Schädigungsindikatoren, dissipierte Energie und Hits für $S_{c,max}=0,70$ (links) und $S_{c,max}=0,85$ (rechts), nach [Scheiden et al., 2019]

Bei der Betrachtung der dissipierten Energie wird deutlich, dass die Zunahme pro Lastwechsel im Allgemeinen für den Granit-Beton größer ist, mit Ausnahme $S_{c,max}=0,85$ nahe dem Bruch. Die Zunahme in Phase I ist größer und in Phase II liegt bei dem geringeren Spannungsniveau ein geringfügig höherer Gradient vor. Im höheren Spannungsniveau kehrt sich das Verhältnis der dissipierten Energien ebenfalls um, welches anhand der Gradienten deutlich wird (vgl. Tabelle 2). Auf dem höheren Spannungsniveau hat der Granit-Beton einen 1,4-fach größeren Ausgangswert der dissipierten Energie, jedoch sind die Verläufe in Phase I nahezu identisch. Der Gradient der dissipierten Energie des Granit-Betons ist im Vergleich in Phase II geringer. Die Zunahme in Phase III hingegen ist beim Basalt-Beton größer. Die kumulierte dissipierte Energie ist für den Granit-Beton auf beiden Beanspruchungsniveaus größer, wobei der Unterschied zum Basalt-Beton beim geringeren Belastungsregime signifikanter ist. Der Steifigkeitsunterschied zwischen den Betonen aufgrund des Wechsels der Gesteinskörnung spiegelt sich auch in der Entwicklung der dissipierten Energie wieder. In den Phasen I und II kann aufgrund des geringeren E-Moduls des Granit-Betons mehr Energie pro Lastwechsel freigesetzt werden.

Als weiterer Schädigungsindikator wurden die Hits pro Lastwechsel der Schallemissionen ausgewertet. Zunächst muss erwähnt werden, dass die Skalierung der Ordinate aufgrund der

jeweiligen Verläufe in den Beanspruchungsniveaus nicht identisch ist. Es ist offensichtlich, dass der Granit-Beton signifikant mehr Hits pro Lastwechsel bei $S_{c,max} = 0,70$ abgibt, welches aus den Amplituden in (Bild 4, links) erkennbar ist. Im Vergleich zum Basalt-Beton zeigt die Schallemissionsaktivität beim Granit-Beton nicht den charakteristischen dreiphasige Verlauf, sondern eine hohe Aktivität von Beginn an bis zum Bruch. Dieses Verhalten wurde an allen Probekörpern sowie in weiteren Untersuchungen, die nicht bis zum Bruch gefahren wurden, beobachtet. Aufgrund der Wiederholbarkeit gehen die Autoren davon aus, dass es sich hierbei nicht um einen Messfehler, sondern um eine Charakteristik handelt. Anders als beim Spannungsniveau $S_{c,max} = 0,70$ tritt bei $S_{c,max} = 0,85$ für beide Mischungszusammensetzungen auch bei der Schallemission das typische 3-phasige Verhalten, analog zu den übrigen Schädigungsindikatoren, auf. Hier ist die Anzahl der Hits pro Lastwechsel des Basalt-Betons in Phase II etwas höher im Vergleich zum Granit-Beton. Die Entwicklung der Hits pro Lastwechsel endet für beide Betone in einer überproportional starken Zunahmen in Phase III. Durch die stärkere Beanspruchung auf dem höheren Spannungsniveau könnten die Signale des Granit-Betons durch hohe Amplituden geprägt sein, sodass schwächere Signale hier seltener detektiert wurden als auf dem niedrigeren Spannungsniveau. Dies führt zur Annahme, dass beim Granit-Beton bereits auf diesem Spannungsniveau zusätzliche Schädigungsmechanismen innerhalb der Gesteinskörnung wirksam sind. Im Vergleich zum Basalt-Beton konnten bei dem Granit-Beton 1.800 fach mehr Hits gemessen werden. Die Gesamtanzahl der Hits differiert auf dem Beanspruchungsniveau von $S_{c,max} = 0,85$ lediglich um das 1,37 fache und ist somit nahezu gleich.

Tabelle 2: Schädigungsparameter (Mittelwerte)

		$S_{c,max}=0,70$		$S_{c,max}=0,85$	
		RH1-B	RH1-G	RH1-B	RH1-G
ε^f	[‰]	3,72	4.27	3.26	3.87
$\Delta\varepsilon_{c,max}^{0-1.0}$	[‰]	1,57	2.06	0.80	0.86
$\Delta\varepsilon_{c,min}^{0-1.0}$	[‰]	1,23	1.44	0.59	0.63
$grade_{c,max}^{II}$	[-]	$2,08 \times 10^{-8}$	4.09×10^{-7}	1.35×10^{-6}	9.41×10^{-7}
$grade_{c,min}^{II}$	[-]	$1,95 \times 10^{-8}$	2.56×10^{-7}	8.62×10^{-7}	5.49×10^{-7}
ΔE_s	[‰]	17,94	26.09	13.55	10.41
$gradE_s^{II}$	[MPa]	-0,03	-2.76	-8.83	-5.46
ΣE_D	[MJ/m ³]	86,07	131.15	2.00	3.72
$gradE_D^{II}$	[-]	9.30×10^{-6}	3.60×10^{-5}	5.00×10^{-3}	3.50×10^{-3}
Σn_H	[-]	1.02×10^4	1.93×10^7	7.34×10^3	1.01×10^4

4 ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Beitrag wurde das Verhalten hochfester Betone unter Druckschwellbeanspruchung im untersucht. Erste Ergebnisse der Untersuchungen, die im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 2020 durchgeführt wurden, zeigen, dass die im Ermüdungsversuch ablaufenden Schädigungen von der groben Gesteinskörnung beeinflusst sind. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf zwei hochfesten Betonen, die sich nur hinsichtlich ihrer groben Gesteinskörnung unterschieden (Basalt, Granit). Die Ermüdungsversuche wurden auf zwei Spannungsniveaus durchgeführt, $S_{c,max} = 0,70$ und $S_{c,max} = 0,85$.

Die Anzahl der Lastwechsel bis zum Bruch war zwar bei beiden Betonen ähnlich, aber die Unterschiede sind dennoch signifikant. Interessanterweise kehrt sich dabei die Reihenfolge der beiden Betone zwischen den beiden Belastungsniveaus um. Während der Granit-Beton auf dem höheren Spannungsniveau höhere Bruchlastwechselzahlen als der Basalt-Beton erreichte, war es bei dem niedrigeren Spannungsniveau umgekehrt. Dass dies nicht zufällig auftritt, sondern mit Schädigungsprozessen im Gefüge zusammenhängt, lässt sich durch eine detaillierte Analyse anhand der Schädigungsindikatoren belegen. Der Granit-Beton erreichte aufgrund seines geringeren E-Moduls bei ähnlicher Festigkeit höhere Dehnungen als der Basalt-Beton. Die Zunahme der Gesamtdehnung und die Dehnung beim Bruch sind ebenfalls im Granit-Beton höher. Auch sind auf dem Spannungsniveau $S_{c,max} = 0,70$ in Phase II die Gradienten der Dehnungen, der Steifigkeit und der dissipierten Energie pro Lastwechsel beim Granit-Beton höher als beim Basalt-Beton. Alle diese Indikatoren zeigen demnach eine stärkere Schädigung des Granit-Betons auf dem niedrigeren der beiden untersuchten Spannungsniveaus an. Auf dem höheren Spannungsniveau ist es genau umgekehrt und der Basalt-Beton zeigt größere Gradienten was größere Schädigungen indiziert.

Weitere Erkenntnisse wurden mit Hilfe der Schallemissionsanalyse erzielt. Der Granit-Beton erzeugt bei $S_{c,max} = 0,70$ ca. 1800mal mehr Signale pro Lastwechsel als der Basalt-Beton sowie eine entsprechend größere Gesamtanzahl, wobei die Signale eine geringere Amplitude bzw. eine schwächere Signalstärke als beim Granit-Beton aufweisen. Die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse zeigen, dass beim Granit-Beton zusätzliche Schädigungsmechanismen wirksam waren. Offensichtlich haben sich diese Schädigungen nur sehr geringfügig, aber dank der hier sehr geringen Streuungen zwischen den Einzelversuchen dennoch erkennbar auf die Bruchlastwechselzahlen ausgewirkt. Weitere detaillierte Analysen zur Schallemission in Verbindung mit hochauflösenden bildgebenden Verfahren (μ CT, REM, TEM) sollen durchgeführt werden, um Hinweise zur Schädigungsentwicklung und –ausprägung zu erhalten und die bei Ermüdung ablaufenden Schädigungsmechanismen besser zu verstehen.

DANKSAGUNG

Die dargestellten Forschungsarbeiten wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unterstützt. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung.

LITERATUR

- Breitenbücher, R., Ibuk, H., & Yüceoglu, S. (2008). Beeinflusst die Kornsteifigkeit der Gesteinskörnung im Beton den Degradationsprozess infolge zyklischer Durckbeanspruchung?. Beton- und Stahlbetonbau 103, 5.
- fib: federation international du Béton (ed.) (2013). *fib model code for concrete structures 2010*. Berlin: Ernst & Sohn.
- GIS: German Institute for Standardization (ed.) (2011). *Eurocode 2: design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, German version DIN EN 1992-1-1:2004 + AC:2010*. Berlin: Beuth Verlag [in German].
- GIS: German Institute for Standardization (ed.) (2014). *DIN EN 12390-13 Testing hardened concrete – Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression; German version EN 12390-13:2013*. Berlin: Beuth Verlag.

- Holmen, J. O. (1979). *Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading*. Trondheim: The Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim.
- Hordijk, D. A., Wolsink, G. M., & de Vries, J. (1995). Fracture and fatigue behaviour of a high strength limestone concrete compared to gravel concrete. *HERON*, 40(2), 1995, 128–145.
- Huemme, J. (2018). *Ermüdungsverhalten von hochfestem Beton unter Wasser. [Fatigue behaviour of high-strength concrete under water] (in German)*. Doctoral dissertation. Report of the Institute of Building Materials Science 18, Leibniz University Hannover. doi: 10.15488/3563.
- Ibuk, H. (2010). *Ermüdungsverhalten von Beton unter Druckschwellbeanspruchung (in German)*. Ruhr-Universität Bochum. Herzogenrath: Shaker Verlag.
- Lee, M. K., & Barr, B. I. G. (2004). *An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete*. *Cement & Concrete Composites* 26, 299–305.
- Lloyd, J.P., Lott, J. L., & Kesler, C. E. (1968). *Fatigue of concrete*. Engineering experiment station. Bulletin 499, Illinois: University of Illinois, vol. 66, No. 42.
- Oneschkow, N. (2014). *Analyse des Ermüdungsverhaltens von Beton anhand der Dehnungsentwicklung. [Analysis of the fatigue behaviour of concrete with respect to the development of strain] (in German)*. Doctoral dissertation. Report of the Institute of Building Materials Science, 13, Leibniz University Hannover. doi: 10.15488/357.
- Oneschkow, N. (2016). *Fatigue behaviour of high-strength concrete with respect to strain and stiffness*. *International Journal of Fatigue*, 87, 38-49. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2016.01.008.
- Oneschkow, N., & Lohaus L. (2017a). *Zum Ermüdungsverhalten von druckschwellbeanspruchtem Beton – Teil 1: Struktur des Ermüdungsnachweises (in German)*. *Beton- und Stahlbetonbau* 112(8). doi: 10.1002/best.201700024.
- Oneschkow, N., & Lohaus L. (2017b). *Zum Ermüdungsverhalten von druckschwellbeanspruchtem Beton – Teil 2: Sicherheitsüberlegungen und Potenzial für Weiterentwicklungen (in German)*. *Beton- und Stahlbetonbau* 112(9). doi: 10.1002/best.201700026.
- Petković, G. (1991). *Properties of concrete related to fatigue damage with emphasis on high strength concrete*. Doctoral dissertation. Trondheim: University of Trondheim.
- Scheiden, T., Oneschkow, N. (2019). *Influence of coarse aggregate type on the damage mechanism in high-strength concrete under compressive fatigue loading*. *Structural Concrete* vol.20, No.4, 1212-1219. doi: 10.1002/suco.201900029
- Wefer, M. (2010). *Materialverhalten und Bemessungswerte von ultrahochfestem Beton unter einaxialer Ermüdungsbeanspruchung (in German)*. Doctoral dissertation. Report of the Institute of Building Materials Science, 7. Hannover: Leibniz University Hannover.