

# Wasserinduzierte Reduktion des Ermüdungswiderstands hochfester Betone

Dipl.-Ing. Christoph Tomann<sup>1</sup> und Prof. Ludger Lohaus<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Germany*

## **KURZFASSUNG:**

Unter Wasser gelagerte und geprüfte Betonproben weisen im Vergleich zu an der Luft gelagerten und geprüften einen erheblich reduzierten Ermüdungswiderstand auf. Dieses Phänomen wurde in der Vergangenheit zwar erkannt, wie genau der Feuchtigkeitsgehalt das Ermüdungsverhalten des Betons beeinflusst ist jedoch bis dato ungeklärt. In Ermüdungsversuchen an hochfesten Betonproben wird untersucht, wie der Feuchtigkeitsgehalt innerhalb des mikrostrukturellen Gefüges des Betons, dessen Ermüdungswiderstand beeinflusst und welche Schadensmechanismen am Degradationsprozess beteiligt sind. Um ein tiefer gehendes Verständnis über die am Degradationsprozess beteiligten Schadensmechanismen zu erlangen, werden neben den erreichten Bruchlastwechselzahlen weitere Schädigungsindikatoren wie die Steifigkeitsdegradation sowie die Schallemissionsaktivität analysiert.

Keywords: Hochfester Beton, Ermüdungsverhalten, wasserinduzierte Schadensmechanismen, Feuchtegehalt, Schädigungsindikatoren

## **ABSTRACT:**

Concrete specimens which are submerged in water have a significantly lower fatigue resistance than specimens which are stored and tested in air. This phenomenon was recognised in the past, but how the moisture content in the microstructure of the concrete and a wet environment influences its resistance against fatigue deterioration is still unknown. Well-instrumented fatigue tests on high-strength concrete specimens are conducted to investigate how the moisture content in the microstructure of concrete influences its fatigue resistance and which additional water-induced damage mechanisms are involved in the degradation process. In order to get a deeper understanding of the damage mechanisms involved in the degradation process, the results of the fatigue tests are analyzed regarding the numbers of cycles to failure and selected damage indicators, such as strain development, stiffness degradation and acoustic emission activity.

Keywords: High-strength concrete, fatigue deterioration, water-induced degradation mechanisms, moisture content, damage indicators

## 1 EINLEITUNG

Mit dem Ausbau der Offshore-Windenergie werden vermehrt auch ermüdungsbeanspruchte Betonkonstruktionen unter permanentem Wassereinfluss entstehen. Dies gilt bereits heute schon für die sogenannten Grouted Joints, bei denen hochfeste Feinkornbetone in stählernen Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen verwendet werden. Solche Konstruktionen werden in ihrer Betriebszeit mit mehreren Hundert Millionen Lastwechseln beaufschlagt. Als ein wesentlicher Unterschied zu Onshore-Bauwerken resultiert aus der Offshore-Exposition ein deutlich erhöhter Wassergehalt im Beton. In diesem Zusammenhang wurde bereits von mehreren Forschern und Forschergruppen, beispielsweise von Waagaard, K. (1981), Muguruma, H., & Watanabe, F. (1984), Hohberg, R. (2004), Sørensen, E. V et al. (2011), Nygard, K. et al. (1992), Petković, G. (1991), Hümme, J., & Lohaus, L. (2014) und Hümme, J. (2018) das Ermüdungsverhalten von Beton bei unterschiedlichen Feuchtebedingungen (an der Luft und unter Wasser) untersucht. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse untereinander fällt schwer, da die Versuchsrandbedingungen innerhalb der einzelnen Untersuchungsreihen stark variieren. Dennoch ergibt sich eine weitgehend einheitliche Tendenz, nämlich, dass unter Wasser geprüfte Betonproben einen erheblich geringeren Ermüdungswiderstand aufweisen als an Luft geprüfte.

Nach Waagaard, K. (1977, 1981, 1982) und Paterson, W. S. (1980) konnte bei Ermüdungsuntersuchungen unter Wasser ein Wassertransport bzw. Wasserpumpen innerhalb des sich bildenden Rissystems beobachtet werden. Dieser Effekt äußerte sich nach Hümme, J., & Lohaus, L. (2014) und Hümme, J. (2018) durch Auswaschungen von Feinstpartikeln in Form von „Nebelschwaden“.

Hinsichtlich der beeinflussenden Wirkung des Mediums Wasser sind bislang einige degradierend wirkende Phänomene erkannt, die Frage, wie genau das Medium Wasser das Ermüdungsverhalten beeinflusst und welche Mechanismen im Detail wirken, ist jedoch derzeit noch völlig ungeklärt. Für die Weiterentwicklung bestehender Bemessungskonzepte zyklisch beanspruchter Betone ist ein tiefergehendes Verständnis dieser Phänomene jedoch essenziell.

Um der Frage nachzugehen, wie genau das Medium Wasser das Ermüdungsverhalten zyklisch beanspruchter hochfester Betone beeinflusst, wurden im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 2020 „Zyklische Schädigungsprozesse in Hochleistungsbetonen im Experimental-Virtual-Lab“ konsistente Versuchsreihe mit Probekörpern unterschiedlicher Feuchtigkeitsgehalte untersucht.

Im Folgenden werden hochgradig instrumentierte Ermüdungsuntersuchungen an hochfesten Betonproben variierender Feuchtigkeitsgehalte dargestellt und analysiert. Ausgewertet wurden in diesem Zusammenhang die erreichten Bruchlastwechselzahlen, die Steifigkeitsdegradation sowie die Schallemissionsaktivität.

## 2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

### 2.1 *Material*

Die experimentellen Untersuchungen unter einaxialer Druckschwellbeanspruchung wurden an dem hochfesten Beton, der Basiszusammensetzung des SPP 2020 durchgeführt. Im Folgenden wird dieser Beton als HPC bezeichnet. Der hochfeste Beton HPC weist einen w/z-Wert von 0,35 auf und besitzt ein maximales Größtkorn von 8mm. Die enthaltene Gesteinskörnung besteht aus Basalt. Zusatzstoffe wie beispielsweise Flugasche oder Mikrosilika sind in der Zusammensetzung des HPC nicht enthalten. Eine detaillierte Übersicht der Betonzusammensetzung des hochfesten Betons HPC ist der folgenden Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Betonzusammensetzung hochfester Beton HPC

| Ausgangsstoff             | Gehalt<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Ausgangsstoff   | Gehalt<br>[kg/m <sup>3</sup> ] |
|---------------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| Zement (CEM I 52,5 R-SR3) | 500                            | Basalt (5/8 mm) | 570                            |
| Quarzsand (0/0,5 mm)      | 75                             | PCE-Fließmittel | 5,00                           |
| Sand (0/2 mm)             | 850                            | Stabilisierter  | 2,85                           |
| Basalt (2/5 mm)           | 350                            | Wasser          | 176                            |

## 2.2 Probekörperpräparation und Feuchteconditionierung

Um den Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts in der Mikrostruktur des Betons und einen möglichen weiteren Einfluss eines von außen anstehenden Mediums Wasser untersuchen zu können, wurden zylindrische Probekörper der Abmessungen  $h/d = 300/100$  mm hergestellt. Im Rahmen des Herstellungsprozesses wurden spezielle Kunststoffschalungen in drei Betonierlagen verfüllt und auf einem Rütteltisch verdichtet. Um verschiedene Feuchtigkeitsgehalte innerhalb der Mikrostruktur des Betons generieren zu können, wurden die Probekörper im Anschluss an den Betonageprozess in die fünf Serien D, C, M, WS und WST unterteilt. Jede dieser Serien repräsentiert hierbei eine spezielle Conditionierungsart (vgl. Tabelle 2). 48 Stunden nach der Herstellung wurden die Probekörper ausgeschalt (mit Ausnahme der Probekörper der Serie M) und den speziellen Conditionierungsarten zugeführt. Vierzehn Tage nach dem Herstellungsprozess wurden die Probekörper auf Länge geschnitten und die Druckeinleitungsflächen fein poliert. Eine detaillierte Übersicht der verschiedenen Lagerungs- und Prüfbedingungen ist der folgenden Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Lagerungs- und Prüfbedingungen

| Feuchtezustand | Konditionierungsart                                  | Versiegelung   | Prüfumgebung |
|----------------|--|----------------|--------------|
| <b>D</b>       | Getrocknet ( $105 \pm 5$ °C)                         | (Al)-Butylband | Luft         |
| <b>C</b>       | Klimaraum (20 °C, 65 % RH)                           | (Al)-Butylband | Luft         |
| <b>M</b>       | Eigenfeuchte (versiegelt bis zur Prüfung)            | (Al)-Butylband | Luft         |
| <b>WS</b>      | Wasser gelagert (unter Wasser gelagert)              | (Al)-Butylband | Luft         |
| <b>WST</b>     | Wasser gelagert (unter Wasser gelagert und getestet) | -              | unter Wasser |

Im Feuchtezustand D erfolgt eine Trocknung der Proben bei  $105 \pm 5$  °C bis zur Massekonstanz. Die so konditionierten Proben repräsentieren einen Feuchtezustand, in dem ausschließlich nichtverdampfbares, im Wesentlichen chemisch gebundenes Wasser, enthalten ist. Für den Feuchtezustand C werden die Proben für mindestens 90 Tage in einem Klimaraum bei konstanten Umgebungsbedingungen (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte) gelagert. Diese vergleichsweise lange Conditionierungsdauer ermöglicht einen langsamen, jedoch ständigen Austrocknungsprozess des Betons, der einem quasi „natürlichen“ Feuchtegehalt (annähernd Ausgleichsfeuchte) entspricht. Feuchtezustand M hingegen repräsentiert den Kernzonenbereich des Betons, bei der ein direkter Feuchteaustausch mit der Umgebung unterbunden ist, sodass der Feuchtezustand bis zur Prüfung konserviert wird. Hierfür verbleiben die Probekörper bis zur Prüfung in der Schalung. Um ein Feuchteaustritt über die Stirnflächen der Probekörper zu verhindern, wurden diese zusätzlich versiegelt. Feuchtezustand WS repräsentiert eine vollständig wassergesättigte Probe. Hierzu werden die

Probekörper direkt im Anschluss an den Betonageprozess bis zum Beginn der Prüfung permanent mit Wasser überstaut und bei konstanter Temperatur (20 °C) gelagert.

Um hygri-sche Interaktionen mit der Umgebung während der Ermüdungsuntersuchungen zu vermeiden, wurden die Mantelflächen der Probekörper der Serien D, C, M und WS vor der Prüfung mittels wasserdichtem (Al)-Butylband versiegelt. Um den Einfluss des Feuchtegehalts in der Mikrostruktur des Betons untersuchen zu können, wurden die Probekörper der Konditionierungszustände D, C, M und WS versiegelt an der Luft geprüft. Die Probekörper der fünften Serie WST wurden analog zu den Probekörpern der Serie WS konditioniert. Die Serien WS und WST unterscheiden sich lediglich in der Prüfumgebung. Um einen möglichen Einfluss des von außen anstehenden Mediums Wasser untersuchen zu können, wurden die Proben der Serie WST unter Wasser gelagert und ebenfalls unter Wasser geprüft. Hierdurch stehen die Proben der Serie WST während der Prüfung in Interaktion mit dem von außen anstehenden Wasser. Eine detaillierte Übersicht über die Lagerungs- und Prüfandbedingungen zeigt Tabelle 2.

### 2.3 Versuchsaufbau und Messeinrichtung

Die experimentelle Untersuchung wurde in einer 2,5 MN servo-hydraulischen Prüfmaschine unter Verwendung eines speziell für diesen Anwendungsfall entwickelten Versuchsaufbau durchgeführt. Die Besonderheit des entwickelten Versuchsaufbaus liegt in einem Wasserbassin, dass einerseits Ermüdungsuntersuchungen in trockener Umgebungsbedingung und andererseits Versuche vollkommen unter Wasser ermöglicht. Die Ermüdungsuntersuchungen wurden kraftgeregelt durchgeführt. Zu Beginn eines jeden Versuchs erfolgte zunächst ein monotoner Kraftanstieg, bis zum Erreichen der Mittellast. Anschließend wechselte die Beanspruchungsart zu einer sinusförmigen zyklischen Druckschwellbeanspruchung. Die bezogene Ober- und Unterspannung betrug konstant über die gesamte Untersuchung einen Wert von  $S_{\max} = 0.65$  und  $S_{\min} = 0.05$ . Die Prüffrequenz wurde ebenfalls konstant zu  $f_p = 1.0$  Hz gewählt. Unter zyklischer Beanspruchung wurden mindestens zwei Probekörper eines jeden Konditionierungszustands (Ausnahme: Konditionierungszustand D) untersucht. Aufgrund einer hohen Lastwechselzahl des Probekörpers des Konditionierungszustand D, wurde bis dato nur ein Probekörper dieser Serie untersucht. Bis zu einer Lastwechselzahl von 5 Mio. konnte kein Versagen dieses Probekörpers nachgewiesen werden. Die Prüffrequenz variierte in diesem Versuch von 1 über 3 auf schlussendlich 6 Hz.

Die statische Druckfestigkeit zur Bestimmung der bezogenen Oberspannung wurde für jede Serie separat, unmittelbar vor dem Start der Ermüdungsuntersuchung, an jeweils drei Probekörpern ermittelt. Die Bestimmung der statischen Druckfestigkeit erfolgte durch eine monoton steigende Druckbeanspruchung mit einer Geschwindigkeit von 0,5 MPa/s.

Die axiale Verformung, die axiale Kraft und die Oberflächentemperatur wurden während der Ermüdungsuntersuchungen konstant mit einer Messrate von 300 Hz aufgezeichnet. Die Erfassung der Schallemissionsaktivität erfolgte mit einer Messrate von 100 Hz. Der verwendete Versuchsaufbau sowie die verwendete Messeinrichtung ist in Bild 1 dargestellt.

Die axiale Verformung wurde mit drei Laserdistanzsensoren, die um 120° (0°, 120° und 240°) versetzt um den Probekörper herum positioniert wurden, gemessen. Um wasserinduzierte Schädigungsmechanismen charakterisieren zu können, wurden zusätzlich Schallemissionssensoren auf den Probekörpern positioniert. Sechs Schallemissionssensoren wurden um 60° versetzt, alternierend im oberen und unteren Drittel der Probe positioniert. Um die Probekörpertemperatur während des

Ermüdungsversuchs überwachen zu können, wurden drei Thermoelemente des Typs K im mittleren, sowie im oberen und unteren Bereich der Probekörper platziert (vgl. Bild 1).

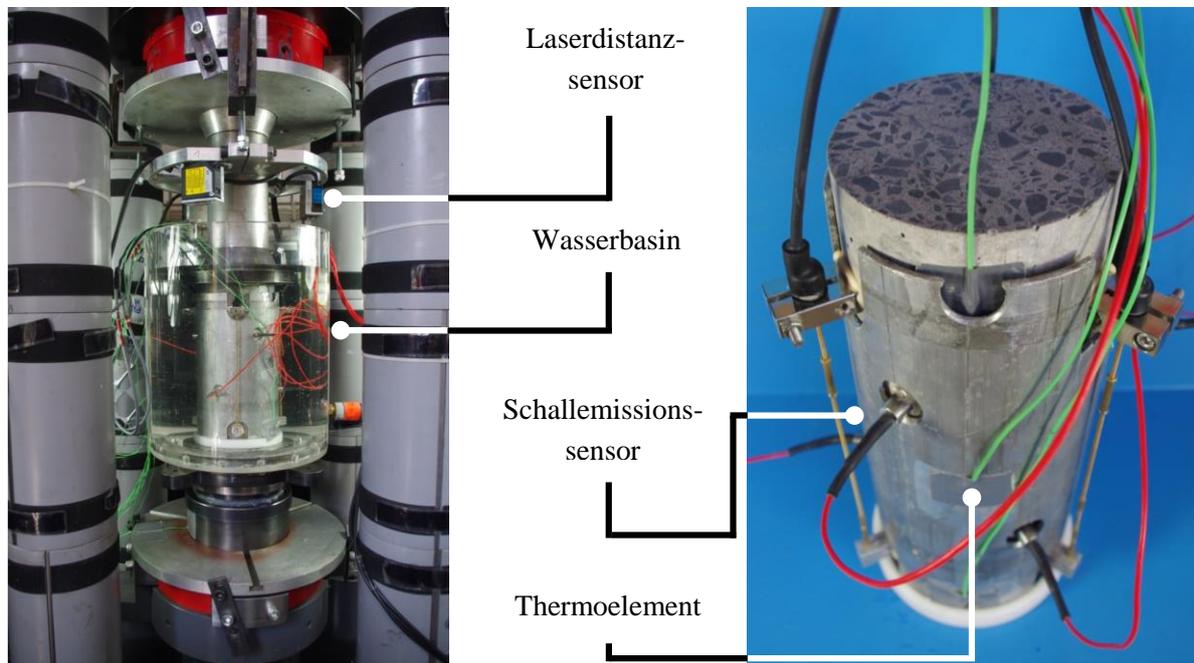


Bild 1: Versuchsaufbau (links) und Messeinrichtung (rechts) (Tomann, C. et al. (2019))

### 3 ERGEBNISSE UND AUSWERTUNG

#### 3.1 Materialeigenschaften

In einem ersten Schritt wurde der Feuchtigkeitsgehalt sowie der dynamische Elastizitätsmodul des Betons in Abhängigkeit der Konditionierungsart (D, C, M, WS und WST) charakterisiert. Der Feuchtigkeitsgehalt wurde mittels Darr-Methode und der dynamische Elastizitätsmodul mit Hilfe eines auf der Resonanzanalyse basierenden Messsystems ermittelt. Tabelle 3 stellt die Feuchtigkeitsgehalte und dynamischen Elastizitätsmodulen in Abhängigkeit der Konditionierungsart als Mittelwerte dar.

Tabelle 3: Materialeigenschaften des hochfesten Betons

| Bezeichnung     | Feuchtegehalt<br>[M.-%] | Dyn. E-Modul<br>[GPa] | Druckfestigkeit<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-----------------|-------------------------|-----------------------|---|
| <b>D</b>        | ~ 0                     | 41,7                  | 108                                     |
| <b>C</b>        | 3,5                     | 47,1                  | 97                                      |
| <b>M</b>        | 4,3                     | 52,4                  | 107                                     |
| <b>WS / WST</b> | 5,0                     | 53,3                  | 110                                     |

Wie erwartet stellt sich über die unterschiedlichen Konditionierungsarten ein steigender Feuchtigkeitsgehalt im Beton ein. Den höchsten Feuchtigkeitsgehalt zeigen hierbei mit einem Wert von 5,0 M.-% die Probekörper der Konditionierungsarten WS und WST.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse des dynamischen Elastizitätsmoduls einen ebenfalls steigenden Trend mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt innerhalb der Mikrostruktur des Betons. Der Tabelle 3 sind Werte zwischen 41,7 GPa für Konditionierungsarten D und 53,3 GPa für Konditionierungsarten WS und WST

zu entnehmen. Diese Ergebnisse entsprechen denen von Hümme, J. (2018) und Winkler, H. (2010). Hümme, J. (2018) ermittelte Unterschiede im dynamischen Elastizitätsmodul zwischen klimaraum- und wassergelagerten Probekörpern von 5 bis 15 %. Winkler, H. (2010) erklärt die Steifigkeitserhöhung der wassergelagerten Probekörper mit einem erhöhten Feuchtigkeitsgehalt innerhalb der Porenstruktur des Betons.

Neben dem Feuchtigkeitsgehalt und dem dynamischen Elastizitätsmodul wurde zudem die Druckfestigkeit unter monoton steigender Beanspruchung in Abhängigkeit der Konditionierungsart bestimmt. Bei den in Tabelle 3 dargestellten Werten handelt es sich um Mittelwert aus jeweils drei Probekörpern. Mit einem Wert von 97 N/mm<sup>2</sup> zeigen die Probekörper der Konditionierungsart C die geringste Festigkeit. Die Probekörper der restlichen Konditionierungsarten weisen hingegen mit Werten zwischen 107 N/mm<sup>2</sup> und 110 N/mm<sup>2</sup> sehr ähnliche Ergebnisse auf. Hierbei konnte der größte Unterschied, mit einer relativen Abweichung von 10,2 %, zwischen den Ergebnissen der Konditionierungsarten C und WS / WST nachgewiesen werden. Offensichtlich überlagern sich hier die Festigkeitssteigernden Effekte der Nacherhärtung einerseits und der trockenen Prüfrandbedingungen andererseits. Bei Lagerungsart C könnten noch hygrysch bedingte Eigenspannungen dazu kommen.

Im Allgemeinen zeigen die Ergebnisse unter einer monoton steigenden Beanspruchung jedoch keine signifikante Beeinflussung des Feuchtigkeitsgehalts innerhalb der Mikrostruktur des Betons auf dessen Druckfestigkeit.

### 3.2 Bruchlastwechselzahl

Bild 2 zeigt den Zusammenhang zwischen der bezogenen Oberspannung  $S_{max}$  und der Bruchlastwechselzahl  $N$  für den untersuchten hochfesten Beton HPC. Die Anzahl der Lastwechsel bis zum Versagen wird auf der Abszissenachse logarithmiert dargestellt. Die Versuchsergebnisse sind sowohl als Einzelwerte (Kreis) als auch als Mittelwerte (Raute) für die jeweiligen Konditionierungsarten (D, C, M, WS und WST) dargestellt.

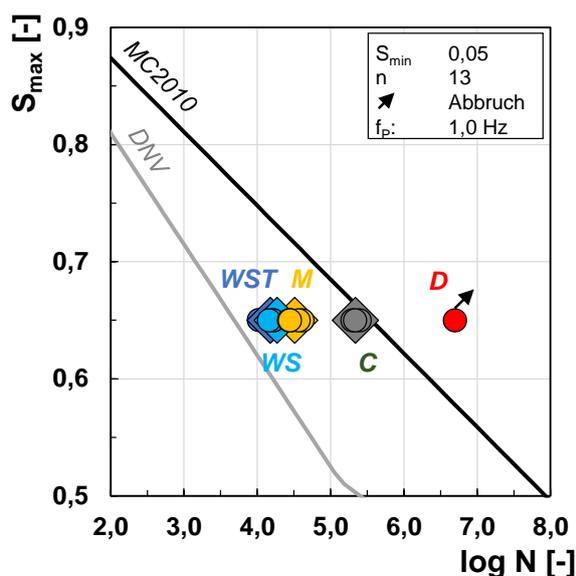


Bild 2: Ermüdungswiderstand (Tomann, C. et al. (2019))

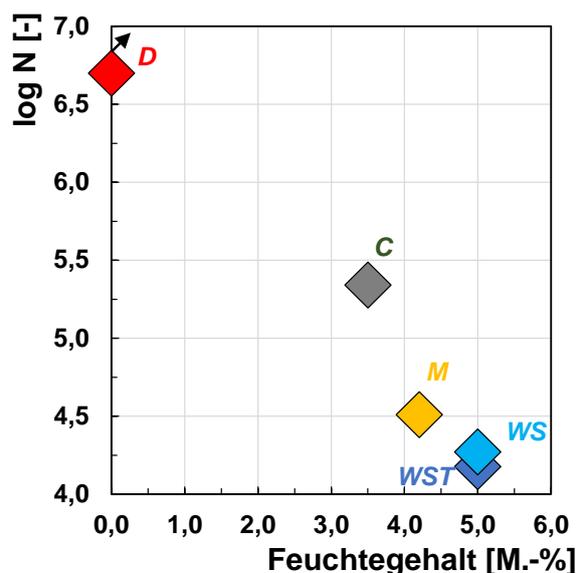


Bild 3: Bruchlastwechselzahl in Abhängigkeit des Feuchtegehalts

Für eine bessere Einordnung der Ergebnisse beinhaltet Bild 2 zudem die Wöhlerlinie nach fib Model Code 2010 für eine trockene Umgebungsbedingung und die Wöhlerlinie nach DNV für eine nasse

Umgebungsbedingung. Dem Bild 2 ist zu entnehmen, dass die Probekörper aller Konditionierungsarten die Anforderungen des DNV übertreffen. Weiterhin zeigt Bild 2, dass die Ergebnisse der Probekörper der Konditionierungsart C sehr nahe an den zu erwartenden Werten nach fib Model Code 2010 liegen. Demzufolge weist der hier untersuchte hochfeste Beton HPC grundsätzlich einen für Beton typischen Ermüdungswiderstand auf. Die in Bild 2 dargestellten Bruchlastwechselzahlen zeigen weiterhin einen sinkenden Ermüdungswiderstand mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt innerhalb der Mikrostruktur des Betons. Zur besseren Verdeutlichung stellt Bild 3 den Zusammenhang zwischen den Mittelwerten logarithmierten Bruchlastwechselzahlen und den Feuchtigkeitsgehalten in einer detaillierteren Weise dar. Es zeigt sich eine starke Beeinflussung des Feuchtegehalts auf den Ermüdungswiderstand des hier untersuchten hochfesten Betons. Die größte Abweichung innerhalb der Bruchlastwechselzahlen ergibt sich mit ca. 2,5 Zehnerpotenzen Unterschied zwischen den Konditionierungsarten D und WST. An dieser Stelle ist zu beachten, dass es sich bei dem untersuchten Probekörper der Konditionierungsart D um einen abgebrochenen Versuch ohne ein Versagen handelt. Dieser Probekörper ist in Bild 2 und Bild 3 mit einem Pfeil gekennzeichnet. Die tatsächliche Bruchlastwechselzahl dieses Probekörpers ist unbekannt, liegt aber in jedem Fall über dem markierten Wert. Die Bruchlastwechselzahlen der Konditionierungsarten C und M gliedern logisch zwischen den Ergebnissen der Konditionierungsarten WST und D ein. Weiterhin zeigt Bild 3, dass die Werte der Konditionierungsart WS ( $\log N = 4,30$ ) sehr nahe an den Werten der Konditionierungsart WST ( $\log N = 4,17$ ) liegen. Diese Tatsache deutet darauf hin, dass nicht das Wasser als Umgebungsbedingung, sondern die Feuchtigkeit innerhalb der Mikrostruktur des Betons wesentlich für die Reduzierung dessen Ermüdungswiderstands verantwortlich ist. Externes Umgebungswasser reduziert den Ermüdungswiderstand des Betons weiter, jedoch nur in geringem Maße.

Im Allgemeinen zeigen die Ergebnisse der Bruchlastwechselzahlen, dass der Feuchtigkeitsgehalt innerhalb der Mikrostruktur den Ermüdungswiderstand des hochfesten Betons erheblich beeinflusst.

### 3.3 Steifigkeitsdegradation

Als erster Schädigungsindikator wird die Entwicklung der Steifigkeitsdegradation analysiert. Bild 4 a) - e) stellt die Steifigkeitsdegradation der Konditionierungsarten D, C, M, WS und WST vergleichend dar. Auf der Abszissenachse wird hierbei die Lastwechselzahl als Absolutwert und auf der Ordinatenachse die Steifigkeit in GPa aufgetragen. An dieser Stelle ist zu beachten, dass aufgrund der stark unterschiedlichen Laufzeiten der Ermüdungsversuche die Einteilung der Ordinatenachse variiert. Die Steifigkeitsentwicklung wird repräsentiert durch den Sekantenmodul ( $E_s$ ), der im Entlastungsast eines jeden Lastzykluses unter Verwendung der Dehnungen bei maximaler und minimaler Spannung errechnet wurde. Wie dem Bild 4 entnommen werden kann, nimmt mit steigendem Feuchtegehalt innerhalb der Gefügestruktur die Anfangssteifigkeit des Betons zu. Die Ergebnisse deuten folglich auf eine mitttragende bzw. stützende Wirkung wassergefüllter Poren hin. Nach Winkler, H. (2010) sind mit Wasser gefüllte Poren nahezu inkompressibel, da das in den Poren befindliche Wasser unter kurzzeitigem Druck nicht oder nur sehr langsam entweichen kann, wodurch sich die Steifigkeit des Betons erhöht. Weiterhin kann dem Bild 4 entnommen werden, dass mit steigendem Feuchtegehalt innerhalb der Gefügestruktur des Betons die Steifigkeitsdegradation zunimmt. Speziell in der zweiten Phase des für Ermüdungsversuche typischen dreiphasigen Verlaufs der Dehnungsentwicklung ist dieses Phänomen erkennbar.

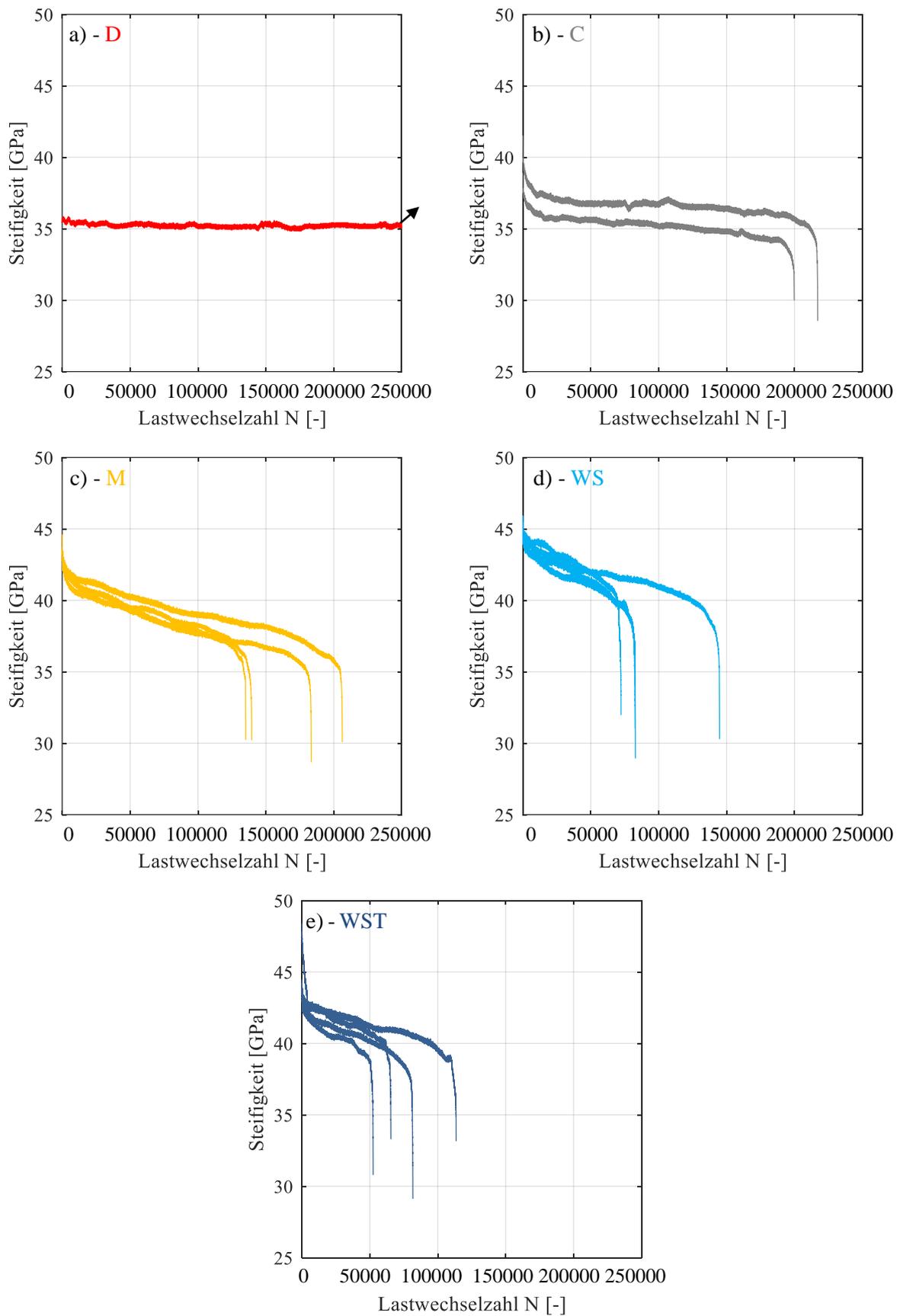


Bild 4: Steifigkeitsdegradation in Abhängigkeit der Konditionierungsart

Bei näherer Betrachtung der Steifigkeitsdegradation des Konditionierungszustands D ergibt sich über eine Laufzeit von 250.000 Lastwechseln ein nahezu horizontal verlaufender Graph, mit keinerlei negativer Steigung. Demzufolge erfährt dieser Probekörper über die ersten 250.000 Lastwechsel nahezu keinerlei Steifigkeitsverlust. Mit zunehmendem Feuchtegehalt zeigen die Ergebnisse in Bild 4 b) - e) einen Zuwachs der Steigung speziell in Phase II, welches mit einem Verlust an Steifigkeit einhergeht. Die schnellsten Steifigkeitsdegradationen zeigen in diesem Zusammenhang die Probekörper der Konditionierungsarten WS und WST.

Folglich zeigen die Ergebnisse der Steifigkeitsdegradation, dass in Abhängigkeit des Feuchtegehalts unterschiedliche Schadensmechanismen wirksam sind. Aufgrund einer erhöhten Steifigkeitsdegradation feucht- und wassergelagerter Probekörper ist von einem Porenwasserdruck in diesen Probekörpern auszugehen, der zu Zugspannungen im Gefüge führt. Neben den mechanischen Schadensmechanismen wirken diese wasserinduzierten Zugspannungen offensichtlich in einem entscheidenden Maße schädigend.

### 3.4 Schallemissionsaktivität

Um tiefer gehende Informationen über die am Degradationsprozess beteiligten Schadensmechanismen zu erlangen, wurde neben Steifigkeitsdegradation zudem die Schallemissionsaktivität als ein weiterer Schädigungsindikator analysiert. Im Allgemeinen zeigen die Untersuchungen eine Erhöhung der Schallemissionsaktivität mit steigendem Feuchtegehalt innerhalb der Mikrostruktur des Betons. Bild 5 und Bild 6 stellen die Entwicklung der Schallemissionsaktivität über die gesamte Versuchsdauer für jeweils einen repräsentativen Probekörper der Lagerbedingungen C und WS vergleichend dar. Der graue Bereich innerhalb der Bilder repräsentiert schematisch die Entwicklung des Verhältnisses zwischen der gemessenen Dehnung und der maximalen Dehnung, die den charakteristischen und bekannten dreiphasigen Verlauf aufzeigt. Die grünen Punkte repräsentieren akustische Emissionssignale, die näher am minimalen Spannungsniveau (unterhalb der Mittelspannung) und die violetten Punkte Signale, die näher am maximalen Spannungsniveau (oberhalb der Mittelspannung) orientiert sind.

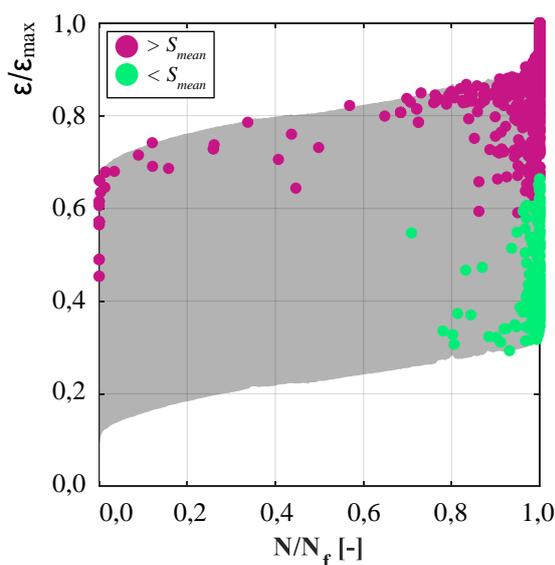


Bild 5: SEA-Aktivität der Konditionierungsart C (Tomann C., & Oneschkow N. (2019))

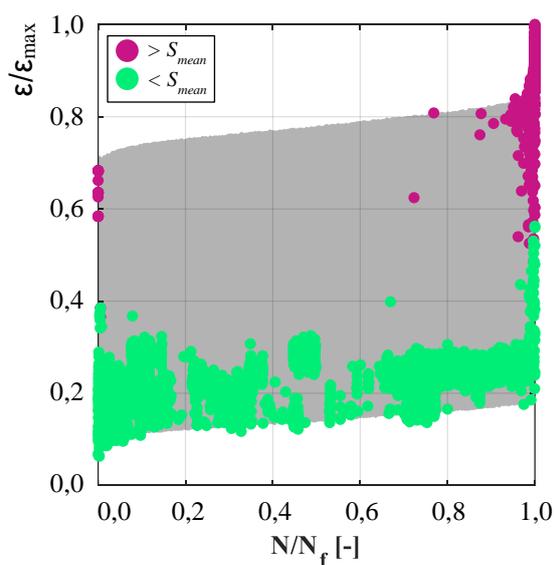


Bild 6: SEA-Aktivität der Konditionierungsart WS (Tomann C., & Oneschkow N. (2019))

Dem Bild 5 und Bild 6 ist zu entnehmen, dass die Schallemissionsaktivität zwischen den beiden Lagerbedingungen C und WS stark unterscheidet. Für die Lagerbedingung C sind in der ersten Phase und in etwa zwei Dritteln der Phase II relativ wenige akustische Emissionssignale erkennbar, die ausschließlich im Bereich der maximalen Belastung auftreten. Die Anzahl der akustischen Emissionssignale steigt im letzten Drittel der Phase II und in der Phase III bis zum Versagen rasant an, wobei Signale in dem Bereich nahe dem maximalen und minimalen Spannungsniveau auftreten. Im Gegensatz dazu wird für die Lagerbedingung WS eine hohe Anzahl von akustischen Emissionssignalen über den gesamten Ermüdungsprozess erfasst, die hauptsächlich in dem Bereich nahe dem minimalen Spannungsniveau auftreten. Akustische Emissionssignale treten nahe des maximalen Spannungsniveaus nur im letzten Drittel der Phase II und in Phase III auf. Ähnlich wie bei Lagerbedingung C steigt die Schallemissionsaktivität in der dritten Phase bis zum Versagen schnell an. Diese Signale können wiederum sowohl dem minimalen als auch maximalen Spannungsniveau zugeordnet werden.

Ein Unterschied im Auftretenspunkt der Schallemissionssignale zwischen den Lagerbedingungen C und WS (im Bereich des maximalen und minimalen Spannungsniveaus) wurde zunächst nicht erwartet. Die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse unterstützen somit die Hypothese, dass es je nach Feuchtigkeitsgehalt des Betons unterschiedliche Schadensmechanismen gibt oder dass zusätzliche wasserinduzierte Schadensmechanismen existieren.

#### **4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK**

In diesem Beitrag werden hochgradig instrumentierte Ermüdungsuntersuchungen an hochfesten Betonprobekörpern variierender Feuchtigkeitsgehalte und Wasser als Umgebungsbedingung dargestellt und analysiert. Ausgewertet wurden in diesem Zusammenhang die erreichten Bruchlastwechselzahlen, die Steifigkeitsdegradation sowie die Schallemissionsaktivität. Die Ermüdungsversuche wurden mit einem Oberspannungsniveau von  $S_{\max} = 0,65$ , einem Unterspannungsniveau von  $S_{\min} = 0,05$  und einer Frequenz von 1 Hz durchgeführt.

Den Ergebnissen ist zu entnehmen, dass der Ermüdungswiderstand des untersuchten hochfesten Betons mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt stark sinkt. Zudem konnte gezeigt werden, dass nicht das Wasser als Umgebungsbedingung, sondern der Feuchtigkeitsgehalt innerhalb der Mikrostruktur des Betons im Wesentlichen für die Reduktion des Ermüdungswiderstands verantwortlich ist.

Die ausgewerteten Schadensindikatoren passen in logischer Art und Weise zusammen und zeigen eine starke Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt in der Mikrostruktur des Betons. Die Ergebnisse der Steifigkeitsdegradation zeigen eine beschleunigte Steifigkeitsdegradation mit zunehmendem Feuchtegehalt. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass ein höherer Feuchtigkeitsgehalt in der Mikrostruktur zu einer erhöhten der Anzahl von akustischen Emissionssignalen im Bereich nahe der Unterspannung führt. Dies zeigt eindeutig, dass unterschiedliche Schadensmechanismen wirksam sind. Aufgrund der erhöhten Steifigkeit feucht- und wassergelagerter Proben ist von einem entsprechenden Porenwasserdruck in diesen Proben auszugehen, der zu Zugspannungen im Gefüge führt. Neben den mechanischen Schadensmechanismen wirken diese wasserinduzierten Zugspannungen offensichtlich in einem entscheidenden Maße schädigend.

Um diese zusätzlich wirkenden wasserinduzierten Schadensmechanismen besser zu verstehen und um sie genauer charakterisieren und beschreiben zu können, sind weitere detaillierte Analysen in Arbeit. Insbesondere sollen hochauflösende bildgebende Verfahren wie Rasterelektronenmikroskopie und Computertomografie sowie zusätzliche Kernspinresonanzmessungen eingesetzt werden, um zukünftig

mehr Informationen über das Auftreten und die Wirkungsweise von feuchtigkeitsbedingten Schadensmechanismen im Beton zu erhalten.

## **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**

- DNV-OS-C502 (2012): Offshore concrete structures, Det Norske Veritas AS.
- Fédération international du béton (ed.) (2013): fib Model Code for concrete structures 2010, Berlin: Ernst & Sohn.
- Hohberg, R. (2004): Zum Ermüdungsverhalten von Beton. Dissertation, Technische Universität Berlin, ehemalige Fakultät VI – Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften, Berlin.
- Hümme, J. (2018): Ermüdungsverhalten von hochfestem Beton unter Wasser, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Nr. 18. Hannover: Institut für Baustoffe.
- Hümme, J., & Lohaus, L. (2014): Fatigue behaviour of high-strength grout in dry and wet environment, Proceedings of the International Wind Engineering Conference IWEC, Hannover
- Muguruma, H., & Watanabe, F. (1984): On the low-cycle compressive fatigue behaviour of concrete under submerged condition, Proceedings of the 27th Japan Congress on Materials Research.
- Nygaard, K., Petković, G., Rosseland, S., & Stemland, H. (1992): The influence of moisture conditions on the fatigue strength of concrete, Cement and Concrete Research Institute, SINTEF report No. 70.
- Paterson, W. S. (1980): Fatigue of reinforced concrete in sea water. American Concrete Institute: 1980.
- Petković, G. (1991): Properties of concrete related to fatigue damage with emphasis on high strength concrete, Dissertation, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Sørensen, E. V., Westhof, L., Yde, E., & Serednicki, A. (2011): Fatigue life of high performance grout for wind turbine grouted connection in wet or dry environment, Poster session presented at EWEA OFFSHORE, Amsterdam, Netherlands.
- Tomann, C., Lohaus, L., Aldakheel, F., & Wriggers, P. (2019): Influence of water-induced damage mechanisms on the fatigue deterioration of high-strength concrete, Proceedings of 6<sup>th</sup> International fib Congress: Concrete – innovations in materials, design and structures, May 27-29, 2019, Krakow, Poland
- Tomann C., & Oneschkow N. (2019): Influence of moisture content in the microstructure on the fatigue deterioration of high-strength concrete, Structural Concrete, 2019;1–8.
- Waagaard, K. (1981): Fatigue strength of offshore concrete structures, COSMAR report PP2-1 and PP2-2
- Waagaard, K. (1982): Fatigue strength evaluation of offshore concrete structures. IABSE proceedings: S. 373–397.
- Waagaard, K. (1977): Fatigue of offshore concrete structures - design and experimental investigations, 9th Annual OTC (offshore technology conference): S. 341–349.
- Winkler, H. (2010): Über mechanische Eigenschaften von normalfestem und hochfestem Beton unter besonderer Berücksichtigung des Elastizitätsmoduls, Research Report Nr. 288. Berlin.