

Ermüdungsverhalten von hochfesten Vergussmörteln

Corinne Otto¹, Nadja Oneschkow¹, Ludger Lohaus¹

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

KURZFASSUNG:

Hochfeste Vergussmörtel werden häufig in Verbindungen der Gründungsstruktur von Windenergieanlagen eingesetzt, wo sie hochzyklischen Beanspruchungen ausgesetzt sind.

Neuere Untersuchungsergebnisse deuten auf ein unterschiedliches Ermüdungsverhalten von Vergussmörteln im Vergleich zu hochfestem Beton hin.

Im Rahmen dieses Beitrags wird das Ermüdungsverhalten von unterschiedlich fein zusammengesetzten Vergussmörteln und einem hochfesten Beton als Referenzbeton verglichen. Anhand der Bruchlastwechselzahlen konnte kein drastischer Unterschied im Ermüdungsverhalten zwischen Vergussmörteln und dem Referenzbeton erkannt werden.

Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die Erwärmungsrate von der Mörtelzusammensetzung und von der bezogenen Oberspannung beeinflusst wird. Eine Korrelation zwischen einer höheren Erwärmungsrate und einer größeren Dehnungszunahme der Unterdehnung in Phase II konnte erkannt werden.

Keywords: Dehnungsentwicklung, Erwärmungsrate, Ermüdungsverhalten, Feinheit der Zusammensetzung, Vergussmörtel

ABSTRACT:

High-strength grouts are commonly used in the connection of wind turbines, where they are exposed to high cyclic loading. The latest scientific results indicate difference between the fatigue behavior of high-strength grouts compared to high-strength concrete. Therefore, the fatigue behaviour of high-strength grouts with different fineness of composition and high-strength concrete as reference was investigated in this contribution. No drastic difference in the fatigue behaviour between high-strength grouts and the reference concrete can be detected on the basis of the numbers of cycles to failure. It could be shown that the heating rate is influenced by the concrete composition and by the maximum stress level. A correlation between a higher heating rate and a larger increase in strain at the minimum stress level could be detected.

Keywords: fatigue behavior, fineness, high-strength grouts heating rate, strain development

1 EINLEITUNG

Aktuelle Weiterentwicklungen in der Betontechnologie führen zu Betonen mit immer höheren Festigkeiten, höherer Fließfähigkeit und kleinerem Größtkorn. Typische Vertreter solcher innovativen Betone sind hochfeste Vergussmörtel, die sich gegenüber Normalbeton durch einen erhöhten Bindemittel- und Feinstanteil und ein kleines Größtkorn, meist zwischen $d_{\max} = 1 \text{ mm}$ und $d_{\max} = 4 \text{ mm}$ gekennzeichnet sind. Regelmäßig werden solche hochfesten Vergussmörtel bei der Herstellung von Verbindungen in Windenergieanlagen eingesetzt, z. B. Verbindungen zwischen Stahlrohren der Tragstruktur, so genannten Grouted Joints (offshore) oder Anschlusskonstruktionen zwischen Turm und Gründungsstruktur (onshore). Dabei sind sie hochzyklischen Beanspruchungen aus Wind, Wellen oder Rotorbetrieb ausgesetzt. Der Ermüdungsnachweis wird bei solchen Konstruktionen stets bemessungsrelevant und entscheidet damit über die Abmessungen und Transportgewichte der Elemente sowie die Kosten und die Realisierbarkeit des Bauwerks. Ermüdungsversuche sollen die gesamte Lebensdauer eines Tragwerks von mehreren Jahrzehnten abbilden. Ermüdungsversuche entsprechen daher stets Zeitrafferversuche, bei denen mit gegenüber der Realität erhöhten Beanspruchungen und meist mit erhöhten Prüffrequenzen geprüft wird, so dass in angemessener Prüfdauer Ermüdungsbrüche erzielt werden können.

In Untersuchungen von (Elsmeier et al.-2016) erreichten feinkörnige Vergussmörtel mit einem Größtkorn von $d_{\max} = 1 \text{ mm}$ und $d_{\max} = 2 \text{ mm}$ bei bezogenen Oberspannungen $S_{\max} \leq 0,75$ und einer Prüffrequenz von $f_p = 10 \text{ Hz}$ deutlich geringere Bruchlastwechselzahlen als ein hochfester Beton mit einem Größtkorn $d_{\max} = 8 \text{ mm}$ oder auch als ein grobkörniger Vergussbeton mit einem Größtkorn von $d_{\max} = 5 \text{ mm}$. Die geringeren Bruchlastwechselzahlen der feinkörnigen Vergussmörtel weisen auf ein von Normalbeton abweichendes Ermüdungsverhalten hin. Es kann vermutet werden, dass mit kleiner werdendem Größtkorn und damit höherer Feinheit der Zusammensetzung der Unterschied im Ermüdungsverhalten von Vergussmörteln und hochfestem Beton größer wird.

Gleichzeitig zeigten die feinkörnigen Vergussmörtel bei vergleichbaren Prüfandbedingungen eine stärkere Probekörpererwärmung mit einer anderen Verlaufsscharakteristik als ein grobkörniger Vergussbeton oder ein hochfester Beton (Elsmeier et al.-2016). Es wird daher angenommen, dass die festgestellten Unterschiede in den Bruchlastwechselzahlen und in der Probekörpererwärmung nicht allein auf prüfbedingte Einflüsse wie die Prüffrequenz, sondern auch auf material- oder gefügebedingte Effekte zurückzuführen sind.

Im Rahmen dieses Beitrags wird das Ermüdungsverhalten von drei hochfesten Vergussmörteln mit unterschiedlicher Feinheit der Zusammensetzung im Vergleich zu einem hochfesten Beton als Referenzbeton betrachtet. Anhand der Betrachtung der Bruchlastwechselzahlen, der Probekörpererwärmung und der Dehnungsentwicklung wird untersucht, ob sich das Ermüdungsverhalten von feinkörnigen Vergussmörteln von dem grobkörniger Vergussmörtel bzw. von hochfestem Beton unterscheidet.

2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Die experimentellen Untersuchungen wurden an drei kommerziell erhältlichen Vergussmörteln (VM0, VM1 und VM3) durchgeführt. Als Referenzbeton wurde ein hochfester Beton (HPC) mit einem Größtkorn $d_{\max} = 8 \text{ mm}$ untersucht. Das Ermüdungsverhalten dieser hochfesten Betonzusammensetzung ist sehr gut dokumentiert und aus den Dissertationen (Oneschkow-2014; Hümme-2018) bekannt. Es zeigte im Vergleich zu feinkörnigen Vergussmörteln eine weniger stark ausgeprägte Probekörpererwärmung bei vergleichbaren Prüfandbedingungen (Elsmeier et al.-2016).

Um die untersuchten Vergussmörtel besser charakterisieren zu können, wurde für sie und für den Referenzbeton das Volumenverhältnis von Gesteinskörnung zu Bindemittel bestimmt. Zum Bindemittelvolumen wurden dabei alle Bestandteile $d_G < 0,125$ mm sowie die Wassermenge gezählt. Weiterhin wurde der Blaine-Wert des Trockenmaterials als Maß der spezifischen Oberfläche (cm^2/g) bestimmt. Die ermittelten Kenngrößen der Zusammensetzung sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Vergussmörtel VM1 und VM3 weisen das gleiche Bindemittelvolumen auf, unterscheiden sich jedoch in der Menge an Feinanteilen $d_G < 0,125$ mm. Zusätzlich ist die ermittelte 28-Tage-Festigkeit als Mittelwert angegeben.

Tabelle 1: Übersicht der Kenngrößen der Zusammensetzung und der 28-Tage-Festigkeit

	HPC	VM3	VM1	VM0
Größtkorn d_{\max} (mm)	8	3	1	0,125
Bindemittelvolumen (dm^3/dm^3)	0,36	0,67	0,67	1
Volumenverhältnis Gesteinskörnung- zu Bindemittel (-)	1,77	0,49	0,49	0
Blaine-Wert (cm^2/g)	n. e.**	2.417	2.696	4.391
Wasserzugabe (%) bzw. w/z-Wert [-]	0,33	9	11	30
28-Tage Festigkeit (MPa)*	131	149	147	110

* Mittelwert aus 2. Chargen bestimmt am 75 mm Würfel

** n. e. = nicht ermittelt

Die Ermüdungsuntersuchungen wurden an zylindrischen Probekörpern mit den Abmessungen ($h/d = 180$ mm/60 mm) im Alter zwischen 33 und 77 Tagen durchgeführt. Alle Probekörper wurden nach 48 Stunden ausgeschalt und bis zur Prüfung unter Wasser gelagert. Die Prüfflächen der Probekörper wurden plan-parallel geschliffen und poliert. Unmittelbar vor der Prüfung wurden die Mantelflächen der Probekörper mittels Butyl-Tape versiegelt, um eine Austrocknung während der Prüfung zu verhindern (vgl. Bild 1).

Für die Untersuchungen wurde eine servohydraulische Prüfmaschine mit 500 kN Maximallast verwendet. Die Ermüdungsbeanspruchungen ($S_{\max} = 0,75$ und $S_{\max} = 0,65$, $S_{\min} = 0,05$) wurden auf die Referenzfestigkeit bezogen, die jeweils anhand von mindestens drei Versuchen unter monoton steigender Beanspruchung mit der gleichen Probekörpergeometrie vor Beginn der Ermüdungsprüfungen durchgeführt wurden. Die sinusförmige Beanspruchung wurde kraftgeregelt mit einer Prüffrequenz von $f_p = 10$ Hz aufgebracht.

Mit einer Abtastrate von 300 Hz wurden die Maschinenkraft, der zugehörige Maschinenweg und die axiale Verformung der Probekörper mit Hilfe von drei um jeweils 120° C versetzten Laserdistanzsensoren aufgezeichnet. Daraus wurden die Dehnungen in den unteren und oberen Spannungspeaks unter Kompensation der Temperaturdehnung ermittelt. Die Oberflächentemperatur wurde an drei über die Höhe verteilten Stellen über Thermoelemente kontinuierlich mit einer Abtastrate von 300 Hz aufgezeichnet. Der Versuchsaufbau ist in Bild 1 abgebildet.

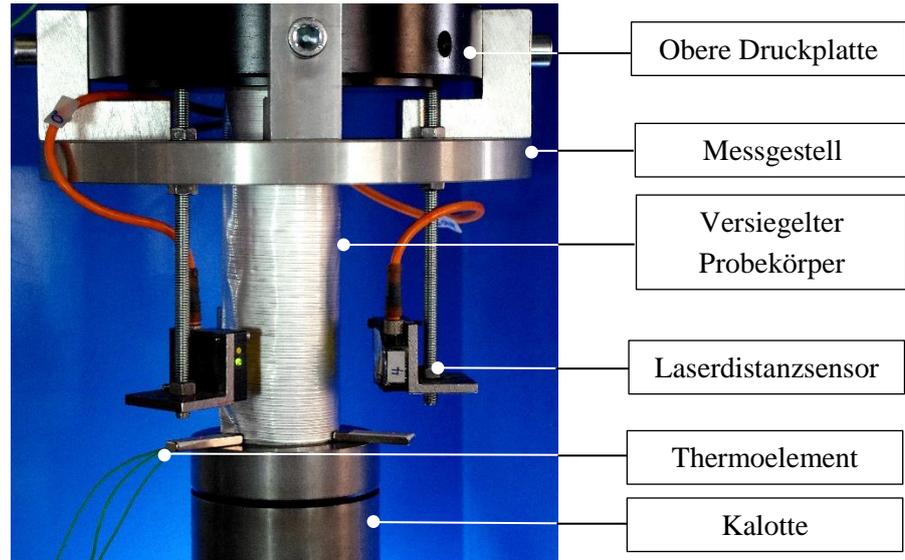


Bild 1: Versuchsaufbau

3 ERGEBNISSE

3.1 Bruchlastwechselzahlen

Zur Einordnung der erzielten Ergebnisse werden in Bild 2 die Einzel- und Mittelwerte der logarithmierten Bruchlastwechselzahlen der Vergussmörtel und des Referenzbetons dargestellt. Die Kreise repräsentieren die Einzelwerte (EW); die Mittelwerte (MW) sind als Dreiecke abgebildet. Ergebnisse, die durch einen Pfeil gekennzeichnet sind, sind „Durchläufer-Proben“, bei denen der Ermüdungsversuch bei einer vorher definierten Lastwechselzahl, ohne das Eintreten des Ermüdungsversagens abgebrochen wurde. Das Durchläuferniveau wurde hier zu 700.000 Lastwechseln gewählt.

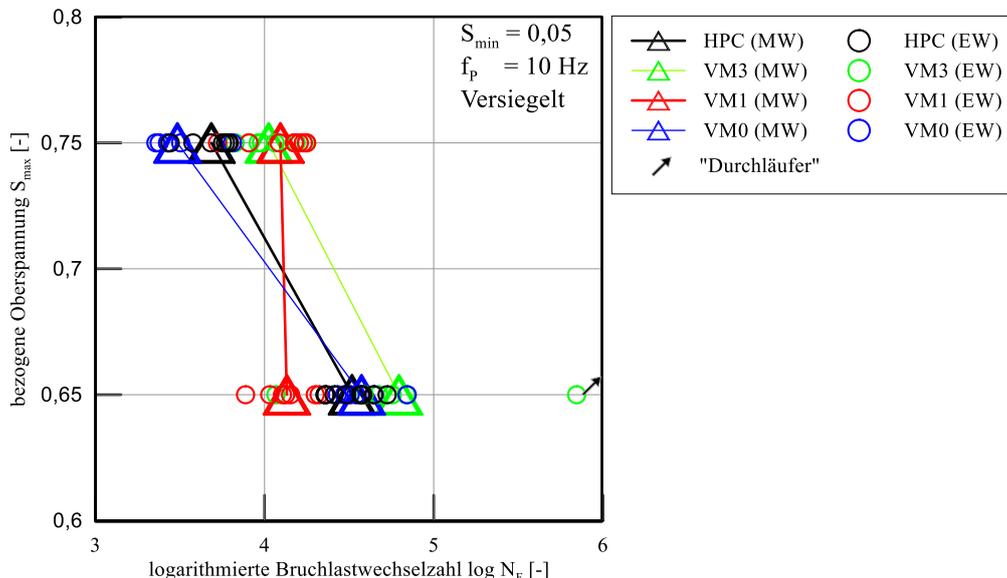


Bild 2: Vergleich der Bruchlastwechselzahlen von Vergussmörteln mit denen des Referenzbetons

Bei beiden bezogenen Oberspannungen liegen die Einzel- und Mittelwerte der Bruchlastwechselzahlen in einem ähnlichen Bereich, wobei sich die Einzelwerte teilweise überschneiden. Die aufgrund der Untersuchungsergebnisse von (Anders & Lohaus-2007; Elsmeier et al.-2016; Elsmeier-2019),

erwarteten drastischen Unterschiede von mehreren Zehnerpotenzen in den Bruchlastwechselzahlen von feinkörnigen Vergussmörteln und hochfestem Beton/grobkörnigem Vergussmörtel konnten für die hier untersuchten Materialien mit den genannten Prüfrandbedingungen nicht bestätigt werden.

Auffällig sind die Bruchlastwechselzahlen des Vergussmörtels VM1 für beide Oberspannungsniveaus. Trotz einer Reduzierung der aufgetragenen Spannung um 10 % konnte kein signifikanter Anstieg der Bruchlastwechselzahl beobachtet werden. Dies ist ein vollkommen atypisches Verhalten, was in der Literatur noch nicht beobachtet wurde. Anhand der geringeren Streuung der Bruchlastwechselzahlen des VM1 kann vermutet werden, dass sich weitere Effekte überlagern und zu den geringeren Bruchlastwechselzahlen für $S_{\max} = 0,65$ führen. Die weiteren Effekte konnten noch nicht geklärt werden und werden in weiteren Versuchsserien untersucht.

Für den Vergussmörtel VM3 ist eine Probe für $S_{\max} = 0,65$ eine Durchläufer-Probe (vgl. Bild 2). Die Ursachen für den wesentlich höheren Ermüdungswiderstand dieser Probe gegenüber den anderen aus der gleichen Serie sind unbekannt. Zwar könnte man eine zufällig höhere Festigkeit dieser Probe unterstellen; angesichts der relativ geringen Streuungen bei den anderen vergleichbaren Prüfserien ist diese Erklärung für sich allein jedoch nicht zufriedenstellend, so dass weitere Effekte hinzukommen müssen. Anhand der vorhandenen Daten konnte dies noch nicht geklärt werden, weshalb diese Probe bei der folgenden Auswertung nicht weiter betrachtet wird.

3.2 Probekörpererwärmung

Mit der Ermüdungsbeanspruchung geht je nach Prüffrequenz, Beanspruchungsniveau und Probekörpergeometrie eine deutliche Probekörpererwärmung einher, wie u.a. von (Elsmeier-2019) und (Bode et al.-2019) thematisiert.

Um diesen Effekt quantifiziert zu vergleichen, wird die Erwärmungsrate v_T als Temperaturanstieg der Probe innerhalb der ersten drei Minuten (= 1.800 Lastwechsel) betrachtet. Für diese Auswertung wurde die Festlegung so getroffen, da bis zu diesem Zeitpunkt auf beiden Beanspruchungsniveaus bei keinem der Probekörper ein Ermüdungsbruch auftrat.

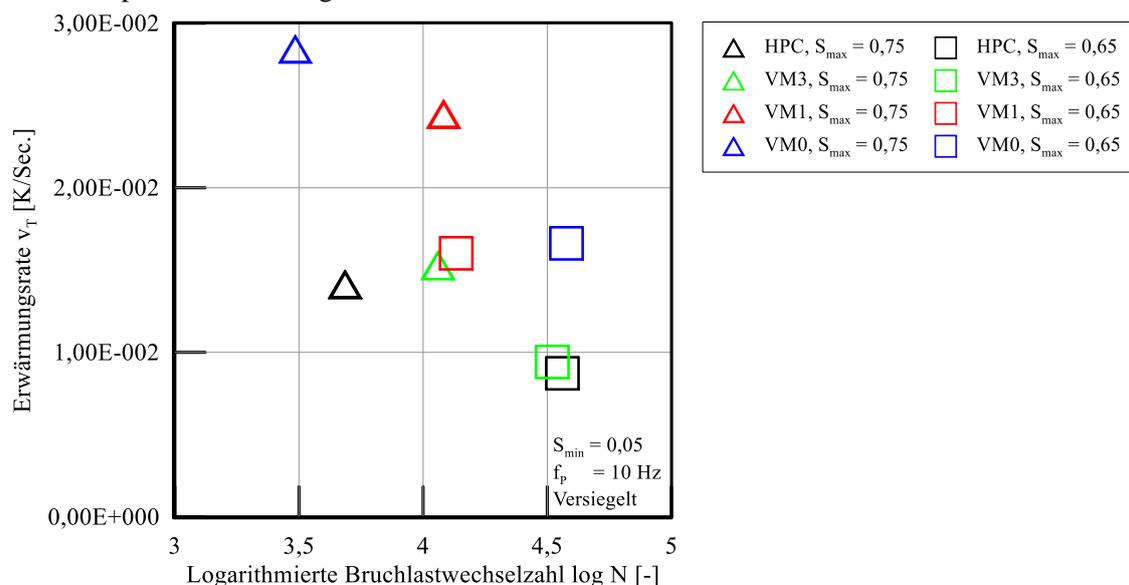


Bild 3: Erwärmungsrate v_T (Mittelwerte) in Abhängigkeit der gemittelten logarithmierten Bruchlastwechselzahl

In Bild 3 ist die Erwärmungsrate als Mittelwert in Abhängigkeit der mittleren Bruchlastwechselzahl der jeweiligen Prüfserien dargestellt. Nachstehend sind in allen Bildern die Ergebnisse für die bezogene

Oberspannung $S_{\max} = 0,75$ als Dreieck und die Ergebnisse für $S_{\max} = 0,65$ als Viereck dargestellt. Es wird deutlich, dass die Erwärmungsrate v_T für alle Vergussmörtel und den Referenzbeton für $S_{\max} = 0,75$ höher ist als für $S_{\max} = 0,65$. Für höhere bezogene Oberspannungen ist die eingetragene Kraft und damit auch die in den Probekörper eingebrachte Energie größer, wodurch mehr Energie vorhanden ist, die in Wärme umgewandelt werden kann.

Weiterhin ist zu sehen, dass sich die mittleren Erwärmungsraten auch bei ähnlicher mittlerer logarithmierter Bruchlastwechselzahl teilweise stark unterscheiden. Die mittlere Erwärmungsrate der feinkörnigen Vergussmörtel ist deutlich höher als die des grobkörnigen Vergussmörtels oder des Referenzbetons. Daraus kann geschlossen werden, dass die Erwärmungsrate von der Betonzusammensetzung abhängig ist. Es konnte weiterhin in (Lohaus et al.-2019) festgestellt werden, dass die Erwärmungsrate auch von der Probekörperfeuchte abhängig ist.

Um einen Zusammenhang zwischen der Feinheit der Zusammensetzung und der Erwärmungsrate zu untersuchen, ist in Bild 4 die Erwärmungsrate als Mittelwert in Abhängigkeit des Blaine-Wertes, als Kenngröße der Feinheit der Zusammensetzung, für beide bezogenen Oberspannungen dargestellt. Für den HPC als Referenzwert wurde der Blaine-Wert der Zusammensetzung aus dem Blaine-Wert des Zementes und der Sieblinie berechnet.

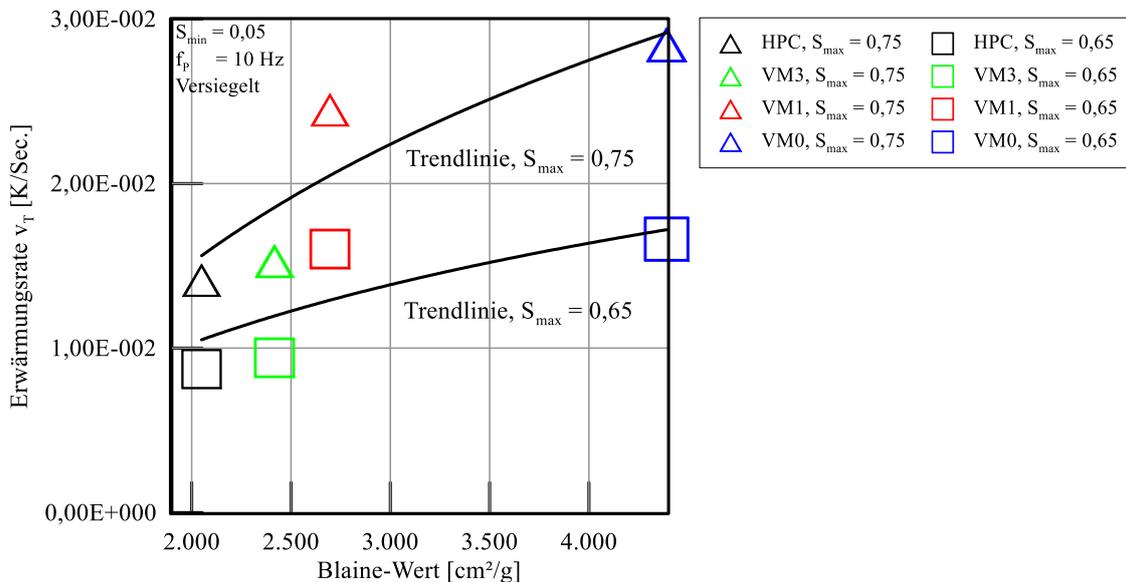


Bild 4: Erwärmungsrate (Mittelwerte) in Abhängigkeit des Blaine-Wertes

Für beide bezogenen Oberspannungen kann die höchste Erwärmungsrate für den Vergussmörtel VM0 mit dem höchsten Blaine-Wert und die geringste Erwärmungsrate für den Referenzbeton HPC ermittelt werden. Für $S_{\max} = 0,75$ veranschaulicht die Trendlinie, dass mit steigendem Blaine-Wert und damit höherer Feinheit der Zusammensetzung die Erwärmungsrate ansteigt. Für $S_{\max} = 0,65$ kann dieser Trend auch beobachtet werden, wenn auch die Trendlinie flacher verläuft.

In der Literatur (z. B.: von der Haar et al.-2016; Elsmeier-2019) werden von verschiedenen Autoren innere Reibprozesse als mögliche Ursache der Probekörpererwärmung genannt. Die höhere Erwärmungsrate mit höherer Feinheit der Zusammensetzung kann ein Indiz für verstärkte innere Reibprozesse sein. Mit höherer Feinheit der Zusammensetzung nimmt die spezifische Oberfläche zu und die Anzahl an Kontaktzonen zwischen Gesteinskorn und Bindemittelmatrix steigt an, wodurch die Anzahl an potentiellen Reibflächen ansteigt (Swamy-1970) und mehr Wärme infolge von Reibung entstehen kann. Andererseits korreliert eine höhere Feinheit der Zusammensetzung mit einem höheren

Zementanteil der Trockenmaterialien. Durch den höheren Zementanteil kann es zu einer größeren inneren Reibung innerhalb des Zementsteins als viskose Phase kommen. Solche Prozesse werden von (Teichen-1968) auch als „flüssige Reibung“ bezeichnet. Zur Unterscheidung dieser unterschiedlichen Prozesse sind weitere Untersuchungen erforderlich.

3.3 Zusammenhang zwischen der Probekörpererwärmung und der Dehnungsentwicklung

In (Elsmeier-2019) wurde für einen feinkörnigen Vergussmörtel festgestellt, dass für geringere Oberspannungsniveaus die Länge der dritten Phase der Dehnungsentwicklung, die durch eine überproportionale Dehnungszunahme geprägt ist, zunimmt. Dabei korreliert die Dehnungsentwicklung mit der Probekörpererwärmung. (Elsmeier-2019) schließt aus diesem Zusammenhang, dass mit zunehmender Dehnung auch die inelastischen Dehnungsanteile größer werden. Weiterhin vermutet sie, dass die Korrelation der überproportionalen Dehnungszunahme und des überproportionalen Temperaturanstiegs in der dritten Phase ein Indiz für innere Reibprozesse sein kann.

Um zu untersuchen, ob ein Zusammenhang zwischen der Probekörpererwärmung und der Dehnungsentwicklung besteht, wird die Korrelation zwischen der Steigung der Unterdehnung in der zweiten Phase (nachstehend Phase II genannt) und der Erwärmungsrate in Phase II betrachtet. Die Unterdehnung wurde gewählt, da diese inelastische Dehnungsanteile deutlicher veranschaulicht als die Oberdehnung. Die Steigung der Unterdehnung wurde anhand einer linearen Regression für jeden Probekörper einzeln ermittelt und daraus der Mittelwert gebildet. Die Erwärmungsrate in Phase II $v_{T,II}$ wurde für jeden Probekörper als Temperaturdifferenz in Phase II bezogen auf die Lastwechselzahl in Phase II berechnet und daraus der Mittelwert berechnet.

In Bild 5 ist gemittelte Steigung der Unterdehnung $\text{grad } \epsilon_{\min}^{II}$ in Abhängigkeit der gemittelten Erwärmungsrate $v_{T,II}$ in Phase II dargestellt.

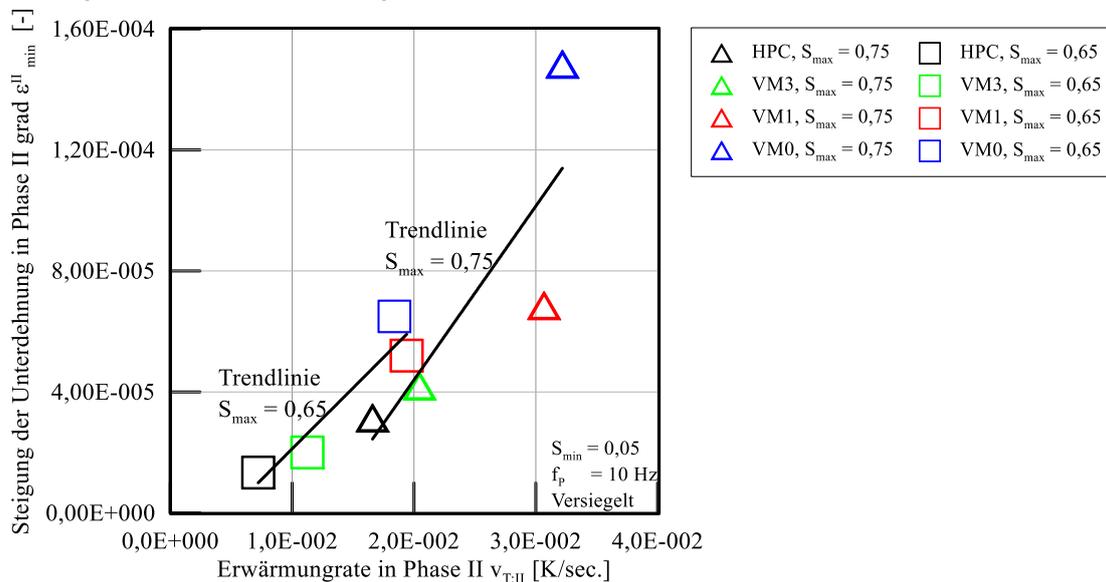


Bild 5: Steigung der Unterdehnung in Phase II $\text{grad } \epsilon_{\min}^{II}$ in Abhängigkeit der Erwärmungsrate in Phase II $v_{T,II}$ (Mittelwerte)

In Bild 5 ist zu erkennen, dass für $S_{\max} = 0,75$ eine höhere Steigung in Phase II ermittelt werden kann als für $S_{\max} = 0,65$. Eine größere Steigung der Unterdehnung bedeutet, dass die Dehnungszunahme je

Lastwechsel und insbesondere die Zunahme der inelastischen Dehnung größer ist. Die größere Dehnungszunahme für $S_{\max} = 0,75$ kann mit der höheren Beanspruchung begründet werden.

Für beide Oberspannungsniveaus kann eine Korrelation zwischen einer höheren Erwärmungsrate und einer größeren Steigung der Unterdehnung erkannt werden. Demnach korreliert eine größere Dehnungszunahme je Lastwechsel mit einer höheren Erwärmungsrate.

Des Weiteren kann für beide Oberspannungsniveaus beobachtet werden, dass die Steigung der Unterdehnung und die Erwärmungsrate in Phase II für die feinkörnigen Vergussmörtel VM0 und VM1 größer sind als für den grobkörnigen Vergussmörtel VM3 und den Referenzbeton HPC. Offensichtlich wird mit steigender Feinheit der Zusammensetzung die Dehnungszunahme je Lastwechsel größer.

Die unterschiedlichen Steigungen in Phase II und die damit verbundenen unterschiedlich großen Dehnungszunahmen können verschiedene Ursachen haben. In den bisherigen Untersuchungen konnten die Ursache für die unterschiedlichen Steigungen noch nicht geklärt werden und es sind hierzu weitere Untersuchungen geplant.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Hochfeste Vergussmörtel werden häufig für Verbindungen von Gründungsstrukturen in Windenergieanlagen onshore und offshore eingesetzt, wo sie hochzyklischen Beanspruchungen aus z. B. Wind, Wellen oder Rotorbetrieb ausgesetzt sind. Der Ermüdungsnachweis wird bei solchen Konstruktionen stets bemessungsrelevant und entscheidet damit über die Realisierbarkeit der Bauwerke. Zum Ermüdungsverhalten von hochfesten Vergussmörteln liegen bislang kaum Ergebnisse vor.

Im Rahmen dieses Beitrags wurde das Ermüdungsverhalten von drei Vergussmörteln mit unterschiedlich feiner Zusammensetzung und einem hochfesten Beton als Referenzbeton untersucht.

Basierend auf der Literaturlauswertung wurden deutliche Unterschiede in den logarithmierten Bruchlastwechselzahlen der feinkörnigen Vergussmörtel und des grobkörnigen Vergussmörtels bzw. des hochfesten Betons erwartet. Der Vergleich der logarithmierten Bruchlastwechselzahlen zeigt jedoch keine drastischen Unterschiede für die hier untersuchten Vergussmörtel und den Referenzbeton mit den genannten Prüfandbedingungen. Auffällig sind die Bruchlastwechselzahlen des feinkörnigen Vergussmörtels VM1. Trotz einer Reduzierung des Oberspannungsniveaus um 10 % kann keine wesentliche Steigerung der Bruchlastwechselzahlen verzeichnet werden. Ein solches Verhalten ist atypisch und ist so bislang nicht in der Literatur zu finden. Es wird vermutet, dass sich verschiedene Effekte überlagern und zu den geringeren Bruchlastwechselzahlen für $S_{\max} = 0,65$ führen.

Des Weiteren wurde der Zusammenhang zwischen der Erwärmungsrate und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl untersucht. Eine Korrelation zwischen der höchsten der Erwärmungsrate und der geringsten Bruchlastwechselzahl konnte nicht erkannt werden. Bei vergleichbarer Bruchlastwechselzahl ist die Erwärmungsrate feinkörniger Vergussmörtel deutlich höher als die Erwärmungsrate des grobkörnigen Vergussmörtels oder des Referenzbetons. Die Erwärmungsrate ist demnach abhängig von der Betonzusammensetzung. Die Auswertung der Erwärmungsrate in Abhängigkeit des Blaine-Wertes zeigte, dass eine höhere Erwärmungsrate mit einer höheren Feinheit der Zusammensetzung korreliert. Die höhere Erwärmungsrate der feinkörnigeren Zusammensetzungen kann ein Indiz für eine verstärkte innere Reibprozesses bei diesen Materialien sein. Mit steigender Feinheit der Zusammensetzung nehmen die potentiellen Reibflächen in der Kontaktzone Gesteinskorn/Bindemittelmatrix zu, wodurch mehr Wärme infolge von Reibung entstehen kann. Die höhere Feinheit der Zusammensetzung korreliert mit einem höheren Zementanteil, wodurch es auch zu

einer größeren inneren Reibung innerhalb des Zementsteins als viskose Phase kommen kann. Diese Art der Reibung wird als „flüssige Reibung“ nach (Teichen-1968) bezeichnet. Um zwischen den verschiedenen Prozessen unterscheiden zu können, sind weitere Untersuchungen geplant.

Unabhängig von der Betonzusammensetzung wurde für alle Vergussmörtel/Referenzbeton eine höhere Erwärmungsrate für $S_{\max} = 0,75$ als für $S_{\max} = 0,65$ ermittelt werden. Für höhere bezogene Oberspannungen ist die eingetragene Kraft und damit auch die in den Probekörper eingebrachte Energie größer, wodurch mehr Energie vorhanden ist, die in Wärme umgewandelt werden kann.

Weiterhin konnte eine Korrelation zwischen einer höheren Erwärmungsrate in Phase II der Dehnungsentwicklung und einer größeren Steigung der Unterdehnung erkannt werden. Eine größere Steigung der Unterdehnung bedeutet, dass die Dehnungszunahme je Lastwechsel und damit enthalten auch die inelastischen Dehnungszunahmen größer werden.

DANKSAGUNG

Die Autoren möchten sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung bedanken.

LITERATUR

- Anders, S.; Lohaus L.: Polymer- und fasermodifizierte Hochleistungsbetone für hochdynamisch beanspruchte Verbindungen wie „Grouted Joints“ bei Windenergieanlagen. Abschlussbericht zum Forschungsstipendium T4/2002, Hannover, 2007
- Bode, M.; Marx, S.; Vogel, A.; Völker, C.: Dissipationsenergie bei Ermüdungsversuchen an Betonprüfkörpern, *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019), Heft 8, S. 548-556
- Elsmeier, K.: Einfluss der Probekörpererwärmung auf das Ermüdungsverhalten von hochfesten Vergussbeton. Dissertation, Hannover, 2019
- Elsmeier, K.; Hümme, J.; Oneschkow, N.; Lohaus L.: Prüftechnische Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten feinkörniger Vergussbetone. *Beton- und Stahlbeton* 111 (2016), Heft 4 S. 233-240
- Hümme, J.: Ermüdungsverhalten von hochfestem Beton unter Wasser, Dissertation, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 18, Hannover, 2018
- Lohaus, L.; Otto, C.; Elsmeier, K.: Probekörpererwärmung als Schädigungsindikator für Ermüdungsversuche an Beton. Abschlussbericht zum DFG-Forschungsvorhaben, 2019
- Oneschkow, N.: Analyse des Ermüdungsverhaltens von Beton anhand der Dehnungsentwicklung, Dissertation, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 13, Hannover, 2014
- Swamy, R. N. “Damping mechanisms in cementitious systems”, *Dynamics Waves in Civil Engineering*, Proceedings of a Conference Organized by the Society for Earthquake and Civil Engineering Dynamics, Howells, D. A., Haigh, I. P. & Taylor, C. eds., University College of Swansea, 7–9 July 1970, Wiley-Interscience, London, pp. 521–542
- Teichen, K.-T.: Über die innere Dämpfung von Beton. Dissertation, 1968, Stuttgart
- von der Haar, C.; Wedel, F.; Marx, S.: Numerical and Experimental Investigations of the Warming of fatigue-loaded Concrete. *Fib Symposium Cape Town* 21.–23.11.2016.