

Vom Baustoff zum sicheren Bauwerk: Einsatz der Schallemissionsanalyse in der Bauabteilung der BAM

Stephan PIRSKAWETZ *, Frank WEISE *, Birgit MENG *, Andreas ROGGE *

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Kurzfassung. Seit 2006 wird die Schallemissionsanalyse (SEA) in der Abteilung 7 Bauwerkssicherheit der BAM genutzt, um Gefügeveränderungen in Betonen zu untersuchen. Dabei haben sich bis heute im Wesentlichen folgende vier Forschungsgebiete herauskristallisiert:

Hydratation

Während der Hydratation von Beton ist eine ausgeprägte Schallemissionsaktivität zu beobachten, anhand derer der Hydratationsverlauf nachvollzogen werden kann. Zur Aufklärung der Quellmechanismen der Schallemissionen besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Des Weiteren kann mit Hilfe der SEA die frühe Rissbildung in Betonen, hervorgerufen durch autogenes oder plastisches Schwinden, analysiert werden.

Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)

Bei der AKR handelt es sich um eine Reaktion alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen mit den Alkalien des Betons bzw. mit extern, z.B. durch Tausalze, zugeführten Alkalien. Dabei werden um die oder in der Gesteinskörnung quellfähige Gele gebildet, die zu einer völligen Zerstörung des Gefüges führen können. Mit der SEA können die Rissbildung detektiert und somit die Schädigungsphasen im Verlauf der AKR identifiziert werden.

Brandverhalten

Unter Brandeinwirkung platzt die Oberfläche gefügedichter Hochleistungsbetone explosionsartig ab. Um dies zu verhindern und somit den Feuerwiderstand von Bauteilen aus Hochleistungsbeton zu erhöhen, werden dem Beton Polypropylenfasern beigemischt. Das Schmelzen der Fasern bei einer Temperaturerhöhung trägt zu einer erhöhten Mikrorissbildung bei, die einen Spannungsabbau ermöglicht. Die SEA konnte erfolgreich eingesetzt werden, um diesen Wirkmechanismus der Fasern nachzuweisen und weiter aufzuklären.

Ermüdungsverhalten

Durch die hohen zyklischen Lasten, für die Türme und Fundamente von Windkraftanlagen ausgelegt werden müssen, gewinnen gesicherte Kenntnisse über das Ermüdungsverhalten von Betonen an Bedeutung. Mit der SEA ist es bei hochzyklischen Belastungsversuchen an Betonen möglich, den Schädigungsgrad im Verlauf der Beanspruchung zu bestimmen. Die Schallemissionsaktivität eignet sich als Kriterium, um die Versuche bei vorab definierten Schädigungsgraden zu unterbrechen und so Proben für weitergehende Untersuchungen zu gewinnen. Diese Ergebnisse sollen perspektivisch für Überwachungssysteme für Betonbauwerke unter zyklischer Beanspruchung genutzt werden.

Einführung

Im letzten Jahrhundert wurde Beton weltweit zum wichtigsten Baustoff. Die Innovationen in der Betontechnologie eröffnen immer neue Anwendungsmöglichkeiten und architektonische Spielräume. Allerdings sind mit der Zementherstellung auch ein hoher energetischer Aufwand und die Freisetzung von Kohlendioxid aus den Rohstoffen verbunden. Schadensfreie und dauerhafte Bauwerke aus Beton erhöhen also nicht nur die Sicherheit, sondern tragen durch eine nachhaltige Nutzung der Rohstoffe auch zum Schutz der Umwelt bei. Mit den im Folgenden vorgestellten vier Beispielen soll gezeigt werden, wie die Schallemissionsanalyse eingesetzt werden kann, um das Bauen mit Beton sicherer und nachhaltiger zu gestalten.

Hydratation

Die Hauptbestandteile des Portlandzementes sind die Mineralien Tricalciumsilicat (C_3S), Dicalciumsilicat (C_2S), Tricalciumaluminat (C_3A) und Calciumaluminatferrit (C_4AF). Beim Mischen mit Wasser entstehen daraus in einer komplexen Reaktion im Wesentlichen die Hydratationsprodukte Calciumsilicathydrat (C-S-H), Calciumhydroxid (CH oder Portlandit), Ettringit und Monosulfat. Dieser Zementstein ist fest, raumbeständig und wasserunlöslich. Das Volumen der Reaktionsprodukte ist ca. 9% geringer als das der Ausgangsstoffe. Bei Mischungen mit Massenverhältnissen von Wasser zu Zement (w/z-Werten) größer als 0,4 sind während der Hydratation trotzdem nur sehr kleine Schwindverformungen festzustellen, da das Schwinden durch eine innere Porenbildung kompensiert wird.

Die hohen Druckfestigkeiten hochfester und ultrahochfester Betone werden unter anderem durch eine sehr dichte Zementsteinmatrix erreicht. Dafür werden die w/z-Werte unter 0,3 gesenkt und der Mischung Mikrosilika zugegeben, deren sehr feine Partikel die Poren füllen und die an der Hydratation beteiligt sind. Aufgrund des geringen Wasserangebots kommt es im Verlauf der Hydratation zu einer Selbstaustrocknung der Matrix, was aufgrund ihrer geringen Permeabilität auch nicht durch eine Wasserzufuhr von außen verhindert werden kann. Daraus resultieren kapillare Zugspannungen, die zu einer Kontraktion der Matrix und somit zu makroskopisch messbaren Schwindverformungen führen. Werden diese Verformungen intern durch die Gesteinskörnung oder extern durch steife Schalungen oder angrenzende Bauteile behindert, entstehen Zwangsspannungen, die eine Rissbildung verursachen können. Die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit des Betons können dadurch herabgesetzt werden.

Das primäre Ziel der Schallemissionsmessungen an erhärtenden Hochleistungsbetonen war daher die Detektion der frühen Rissbildung. Details zum dafür entwickelten Versuchsaufbau und zum Versuchsprogramm sind in [1] zusammengestellt. Diese Versuche haben gezeigt, dass die Hydratation von Zementleimen mit einer phasenweise hohen Schallemissionsaktivität verbunden ist, die nicht auf eine Rissbildung zurückgeführt werden kann. In der Literatur [2], [3] werden Mikrorissbildung, Kavitation bei der Entleerung der Poren sowie Kristallwachstum als möglich Schallemissionsquellen diskutiert. In weiteren Versuchen wurde daraufhin der Einfluss der Zusammensetzung des Zementleims auf die Schallemissionen während der Hydratation untersucht. Einen Teil des verwendeten Versuchsaufbaus, mit dem Zwangsspannungen in den Proben ausgeschlossen werden können, zeigt Abbildung 1. Mit dieser Anordnung konnten die Schallemissionen an sechs Proben gleichzeitig gemessen werden.

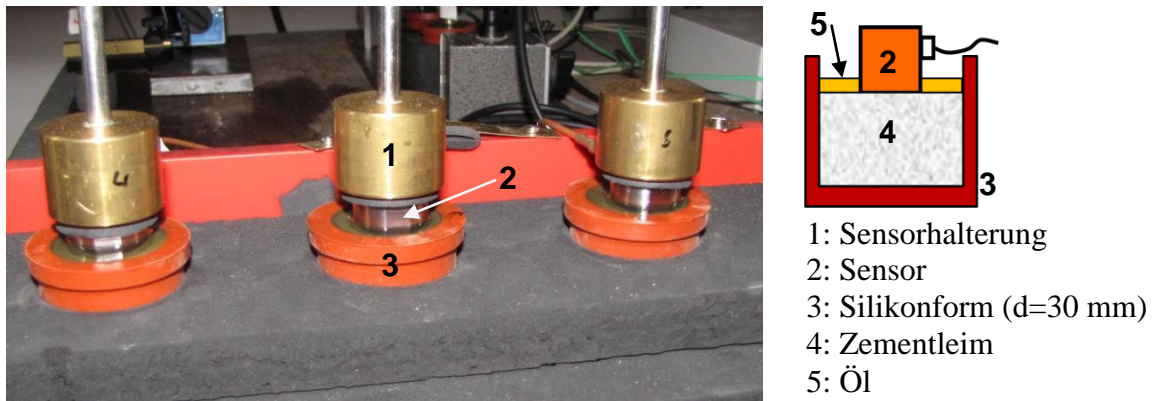


Abbildung 1. Versuchsaufbau zur Messung der Schallemissionsaktivität in erhärtenden Zementleimen

Die Diagramme der Abbildung 2 zeigen die Ergebnisse der Messungen für zwei Zementleime eines selbstverdichtenden Betons. Für diese Leime liegen Röntgenbeugungsmessungen (XRD) während der Hydratation vor, anhand deren die Entwicklung des Portlandits und die Lösung der Klinkerphase C_3S nachvollzogen werden kann [4]. Die Zusammensetzung der Mischungen, die sich lediglich durch die verwendeten Fließmittel (FM) unterscheiden, gibt Tabelle 1 wieder. Bei den Fließmitteln handelt es sich um ein hoch geladenes Polycarboxylatether (HC-PCE) und ein niedrig geladenes PCE (LC-PCE). Bei gleicher Wirksamkeit, d.h. bei gleicher verflüssigender Wirkung auf den Zementleim, wird von dem LC-PCE eine höhere Dosierung des Wirkstoffes benötigt. Die hydrationsverzögernde Wirkung, die alle Fließmittel haben, ist daher bei der gewählten Dosierung ausgeprägter als bei der Mischung mit HC-PCE.

Tabelle 1. Zusammensetzung der Mischungen

	Mischung mit High Charge PCE	Mischung mit Low Charge PCE
Bezeichnung	HC 0,42%	LC 0,66%
w/z-Wert	0,5	0,5
Portlandzement (CEM I 42,5)	1044 kg/m ³	1044 kg/m ³
Füller: Kalksteinmehl	389 kg/m ³	389 kg/m ³
Wasser	523 kg/m ³	523 kg/m ³
Fließmittel	HC-PCE 0,42 M-% von Zement	LC-PCE 0,66 M-% von Zement

Beide Mischungen zeigen innerhalb der ersten zwölf Stunden nach der Wasserzugabe eine hohe Schallemissionsaktivität, die dann sehr schnell abklingt. In dieser Zeit ist der Zementleim noch fließfähig. Den Erstarrungsbeginn und damit den Übergang zum Festkörper markieren die senkrechten Linien in den Diagrammen. Eine Rissbildung als Ursache für die Schallemissionen kann vor der Erstarrung ausgeschlossen werden. Eine mögliche Quelle der Schallemissionen ist die Bildung von Syngenit, dessen relativ große (500 nm) tafelige Kristalle eine wichtige Rolle beim Abbindeverhalten spielen.

In der folgenden Phase, die bis 17 bzw. 25 Stunden nach der Wasserzugabe anhält, werden nahezu keine Schallemissionen registriert. Bis zum Erstarrungsbeginn konnten deutliche Verringerungen im C_2S und C_3S -Gehalt beobachtet werden. Ab diesem Zeitpunkt lassen sich aber keine signifikanten Veränderungen der Klinkerphasen C_2S und C_3S mehr feststellen, was darauf schließen lässt, dass eine beschleunigte C-S-H-Bildung stattfindet. In der Mischung mit dem HC-PCE ist nach 17 Stunden ein ausgeprägter und relativ kurzer Anstieg der Schallemissionsaktivität zu verzeichnen. Der erneute Anstieg der Schallemissionsaktivität in der Mischung mit dem LC-PCE erfolgt später, was mit der stärker verzögernden Wirkung des LC-PCEs korreliert. Die Ursache für die Schallemissionen beider Mischungen in dieser Phase ist noch ungeklärt. Da das ohnehin geringe Schwinden nicht

durch eine Gesteinskörnung oder durch die Form behindert wird, ist eine Rissbildung unwahrscheinlich. Auch Kavitation bei der Entleerung der Poren ist als Quelle für die Schallemissionen wenig wahrscheinlich, da bei einem w/z-Wert von 0,5 genügend Wasser für die Hydratation zur Verfügung steht. Ob Kristallwachstum oder noch weitere Mechanismen für die Schallemissionen verantwortlich sind, bleibt noch in weiterer Forschungsarbeit zu klären.

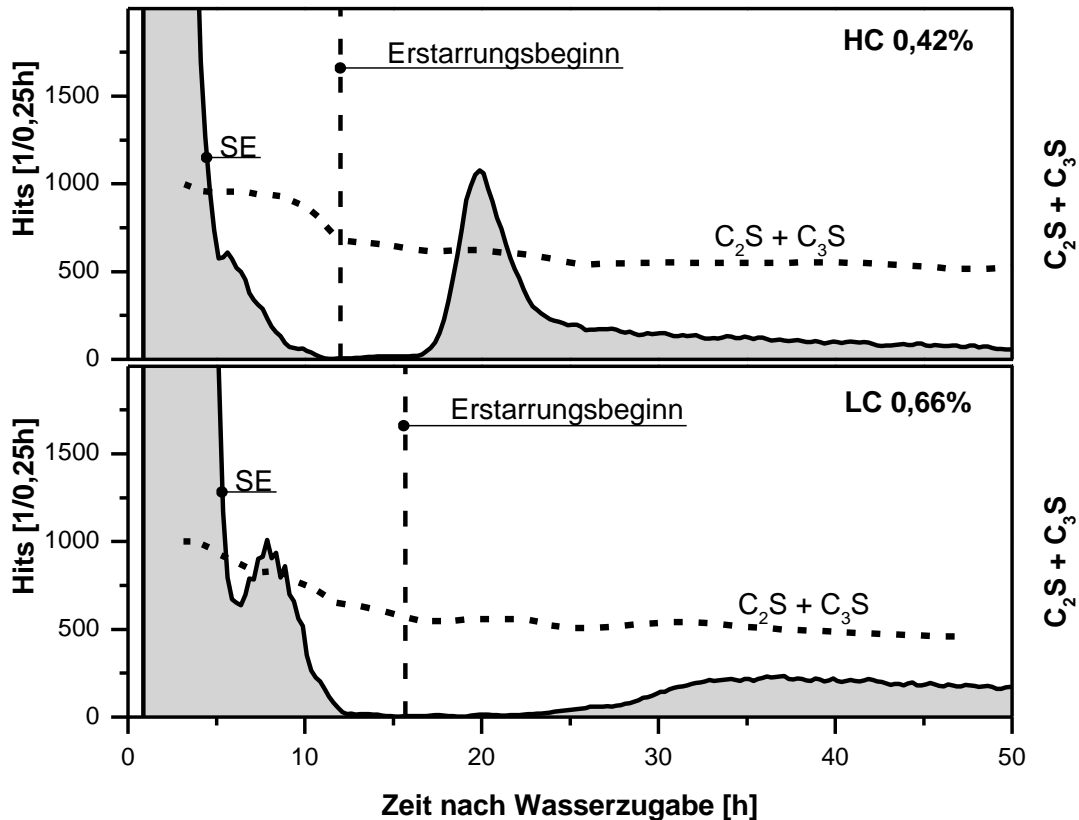


Abbildung 2. Ergebnisse der Schallemissionsmessungen und Abnahme der Klinkerphasen C_3S und C_2S über die Zeit (aus XRD) [4] an erhärtenden Zementleimen

Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)

Bei der AKR handelt es sich um eine chemische Reaktion alkaliempfindlicher, kieselsäurehaltiger Gesteinskörnungen mit der alkalischen Porenlösung des Betons. Die Alkalien stammen einerseits aus dem zur Herstellung des Betons verwendeten Zement sowie den Betonzusatzmitteln und -stoffen und können andererseits von außen, z.B. durch Taumittel, eingetragen werden. In Stahlbetonbauwerken hat die herstellungsbedingte Alkalität des Betons die wichtige Funktion, den Bewehrungsstahl vor Korrosion zu schützen. Zu den alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen zählen unter anderem Opalsandstein, Flint, Grauwacke und Quarzporphyr. Während der AKR bildet sich in der Gesteinskörnung bzw. an deren Oberfläche ein hydrophiles, quellfähiges Alkali-Kieselsäuregel. Die mit einer Wasseraufnahme verbundene Volumenvergrößerung des Gels kann zu einer Rissbildung im Beton bis hin zur völligen Zerstörung des Gefüges führen. Abbildung 3 zeigt die für eine AKR typische netzförmige Rissbildung sowie eine mikroskopische Aufnahme eines gelgefüllten Risses, der durch die Gesteinskörnung und die Zementsteinmatrix des Betons verläuft.

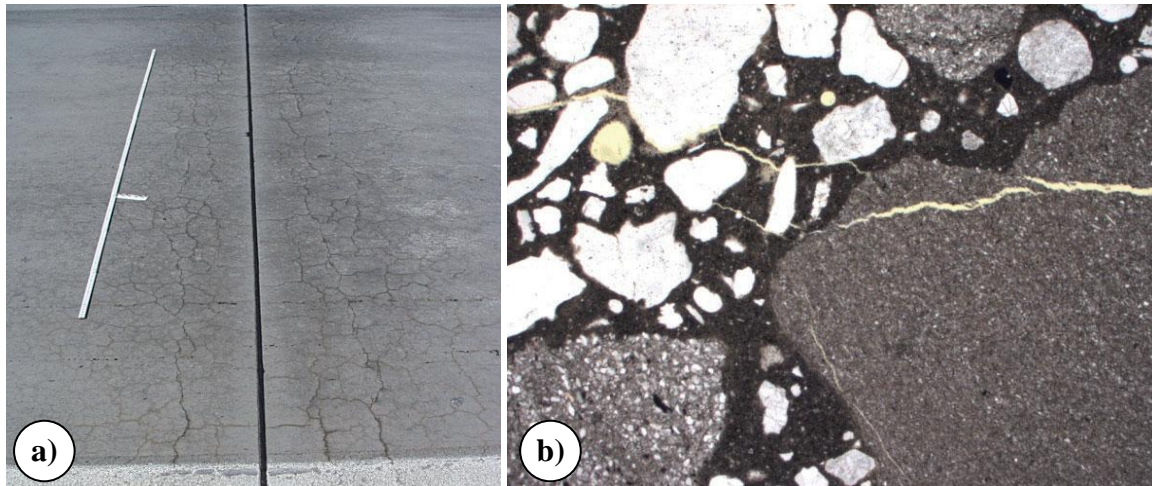


Abbildung 3. a) typisches Schadensbild infolge einer AKR in einer Autobahn
 b) mikroskopisch Aufnahme eines AKR-geschädigten Betons mit gelgefüllten Rissen in der Gesteinskörnung und der Zementsteinmatrix

Um AKR-Schäden an feuchtebelasteten Bauwerken, wie z.B. Autobahnen, Brücken oder Wasserbauwerken ausschließen zu können, muss sichergestellt werden, dass die verwendete Gesteinskörnung nicht alkaliempfindlich ist. Hierfür existiert eine Reihe von Prüfvorschriften [5]. Für den 60°C-Betonversuch [5] werden aus der zu prüfenden Gesteinskörnung und einem alkalireichen Prüfzement Betonprismen mit Abmessungen von 7,5 x 7,5 x 28 cm³ hergestellt, die dann 140 Tage bei einer Temperatur von 60°C und einer relativen Luftfeuchte von mindestens 98% gelagert werden. Als Kriterium für die Reaktivität der Gesteinskörnung gilt die Längenänderung der Proben, die zu festgelegten Zeitpunkten bei einer Probentemperatur von 20°C bestimmt wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Längenänderung bzw. die Dehnung der Proben durch die Rissbildung infolge der AKR verursacht wird. Mit dieser Prüfung lassen sich zwar alkaliempfindliche Gesteinskörnungen identifizieren, allerdings können der Schädigungsprozess und dessen zeitlicher Verlauf nicht beobachtet werden. Nachteilig ist weiterhin, dass die Proben für die Messungen dem Prüfklima entnommen und abgekühlt werden müssen.

Die Schallemissionsanalyse wurde im Rahmen von Forschungsvorhaben in der BAM erstmals eingesetzt, um den zeitlichen Verlauf der Rissbildung im 60°C-Betonversuch abbilden zu können ([6], [7]). Kombiniert wurde die Schallemissionsanalyse mit einer automatischen Messung der Ultraschallgeschwindigkeiten der Proben sowie mit kontinuierlichen Dehnungsmessungen. Abbildung 4 zeigt die Messanordnung. Die Schallemissionssensoren, gleichzeitig als Ultraschallgeber verwendet, wurden mit einem Edelstahlbügel an die Stirnseiten der Proben geklemmt. Die Proben wurden von Stahlrahmen gehalten, in deren oberen Querhäuptern induktive Wegaufnehmer integriert waren. An ausgewählten Proben wurde zur zerstörungsfreien Visualisierung der Rissbildung eine Computertomographie durchgeführt. Dafür war es notwendig, die Probengeometrie auf Zylinder mit einem Durchmesser von 7 cm und einer Länge von 28 cm zu ändern.

In einem Vorversuch zeigte sich, dass das Prüfklima zusammen mit der hohen Alkalität der Probenoberflächen die zunächst eingesetzten Wegaufnehmer und Schallemissionssensoren innerhalb des Prüfzeitraumes zerstörte. In Zusammenarbeit mit zwei Herstellerfirmen wurden daraufhin vollständig gekapselte, korrosionsfeste Sensoren entwickelt, die inzwischen schon mehrere Prüfzeiträume schadensfrei überstanden haben.

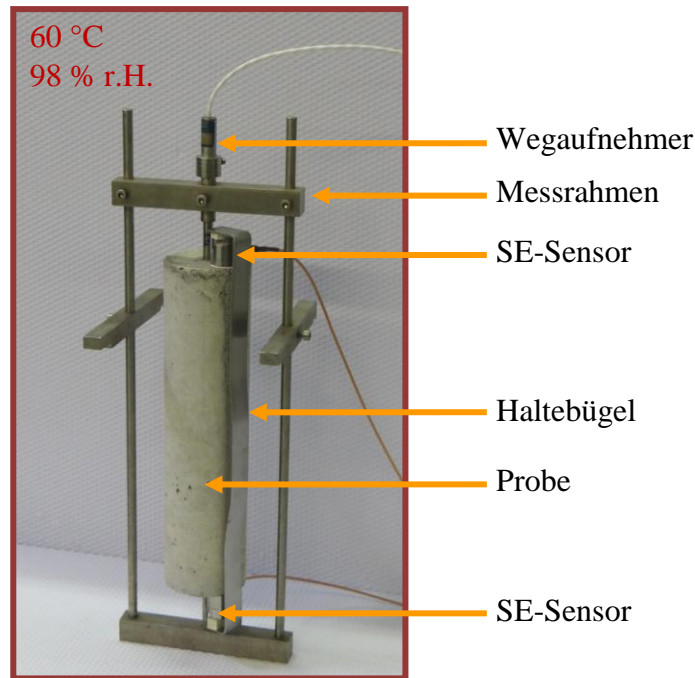


Abbildung 4. Anordnung zur Messung der Schallemissionsaktivität, der Ultraschallgeschwindigkeit sowie der Längenänderung an Proben bei einer AKR-provozierenden Lagerung (60°C und 98% rel. Luftfeuchte)

Mit der beschriebenen Kombination von Prüfverfahren kann die Schadensentwicklung in den Proben sehr gut nachvollzogen werden. Die Diagramme in Abbildung 5 zeigen dies am Beispiel eines Betons, bei dem Grauwacke als Gesteinskörnung verwendet wurde.

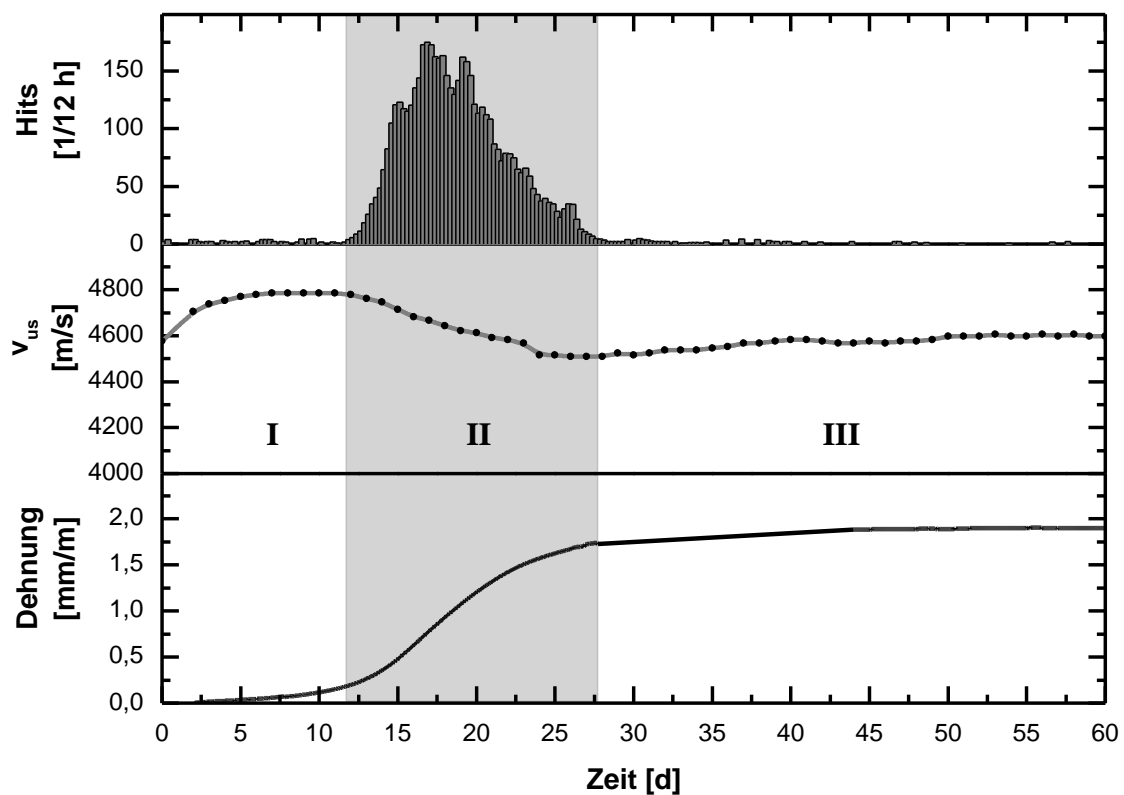


Abbildung 5. Ergebnisse der Schallemissions- Ultraschall- und Dehnungsmessungen an einer Betonprobe mit Grauwacke im 60°C-Betonversuch [6], [7].

Der Verlauf der Gefügeveränderungen in Proben mit reaktiver Gesteinskörnung lässt sich typischerweise in drei Phasen einteilen, die im Diagramm mit I, II und III markiert sind.

Die erste Phase ist durch die Festigkeitsentwicklung der zum Zeitpunkt der Einlagerung erst 2 Tage alten Proben gekennzeichnet. Dies äußert sich in der in den ersten 12 Tagen noch ansteigenden Schallgeschwindigkeit. Nennenswerte Schallemissionen sind in dieser Zeit nicht zu beobachten. Auch die Dehnung der Probe ist noch sehr moderat und kann wahrscheinlich auf hygrisches Quellen zurückgeführt werden. Indikatoren für eine Rissbildung lassen sich in dieser Phase noch nicht finden.

In der Phase II ist ein schneller Anstieg der Schallemissionsaktivität auf bis zu 300 Hits pro Tag festzustellen, während gleichzeitig die Schallgeschwindigkeit zurückgeht. Außerdem beginnt die Probe sich schnell zu dehnen. Die Ergebnisse aller drei Messungen lassen auf eine intensive Rissbildung in der Phase II schließen. Belegen lässt sich die Rissbildung, welche durch die Gesteinskörnung als auch durch die Zementsteinmatrix läuft, anhand der röntgentomographischen Aufnahmen (Abbildung 6), die vor und während des Versuchs gemacht wurden.

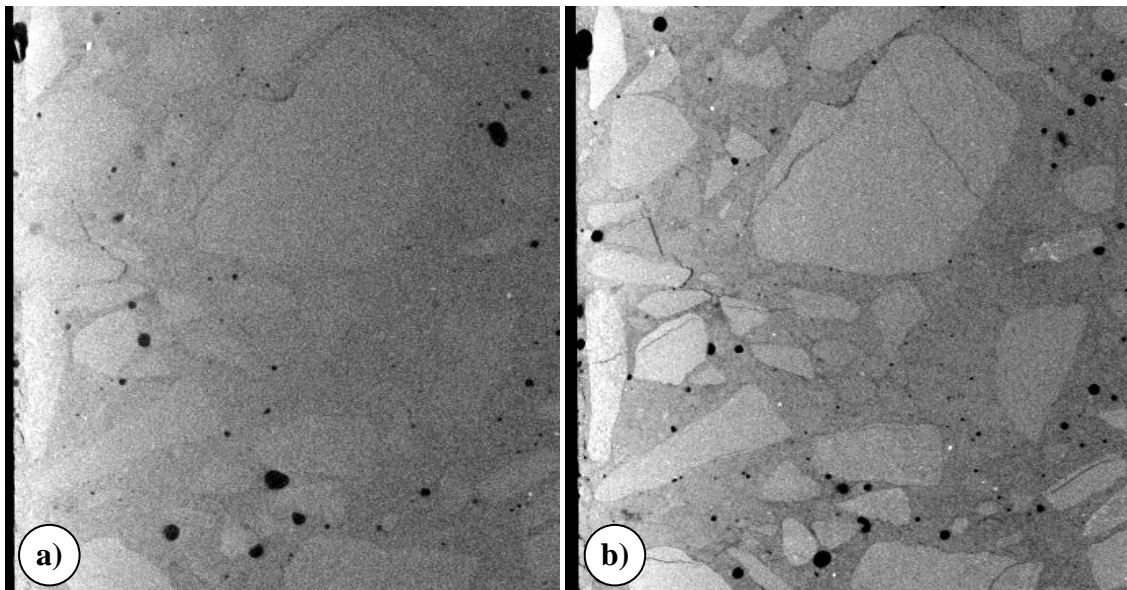


Abbildung 6. Ausschnitt aus einer röntgentomographischen Aufnahme (μ R-3D-CT) der Probe [6], [7]
a) vor dem 60°C-Betonversuch, b) nach 140 Tagen Lagerung bei 60°C und 98 % rel. Luftfeuchte

Während der Phase III treten fast keine Schallereignisse mehr auf. Auch die Dehnung nimmt nur noch sehr langsam zu und strebt einem konstanten Wert entgegen. Der erneute leichte Anstieg der Schallgeschwindigkeit ist wahrscheinlich auf die allmähliche Füllung der Risse mit Alkali-Kieselsäuregel zurückzuführen. Zu Beginn dieser Phase ist die AKR offensichtlich zum Erliegen gekommen. Da mit der Gesteinskörnung noch viel alkaliempfindliches Material zur Verfügung steht, kann dies nur auf ein mangelndes Angebot von Alkalien zurückgeführt werden.

Brandverhalten

Bei der Bemessung von Bauteilen aus Beton wird in der Regel angestrebt, dass diese bei einem Brand mindestens 90 Minuten die Bemessungslast tragen können. Somit soll eine ausreichende Evakuierungszeit für Gebäude gewährleistet werden. Für traditionelle Betone gibt es Bemessungsvorschriften wie den Eurocode 2 [8], in denen Elemente wie Stützen, Wände oder Träger geregelt sind. Moderne Hochleistungsbetone mit hohen Druckfestigkeiten oder hinsichtlich der Verarbeitungseigenschaften optimierte selbstverdichtende Betone haben ein deutlich dichteres Gefüge als traditionelle Normalbetone. Bei einer Brandbelastung kann das in den Poren enthaltene Wasser nur sehr langsam entweichen, wodurch im

Porenraum sehr hohe Dampfdrücke aufgebaut werden können. Wenn die Dampfdrücke die Zugfestigkeit des Betons überschreiten, führt dies zu explosionsartigen Abplatzungen, die den Feuerwiderstand der Konstruktionselemente deutlich verringern. Durch das Einmischen von feinen Polypropylenfasern (PP-Fasern) in den Frischbeton kann das Abplatzen wirksam verhindert werden. Abbildung 7 zeigt dies anhand von zwei Proben, die einer Tunnelbrandprüfung unterzogen wurden. Um zukünftig PP-Fasern bzw. Betonrezepturen mit PP-Fasern für diesen Anwendungsfall optimieren zu können, muss die Wirkungsweise der Faser weiter erforscht werden.

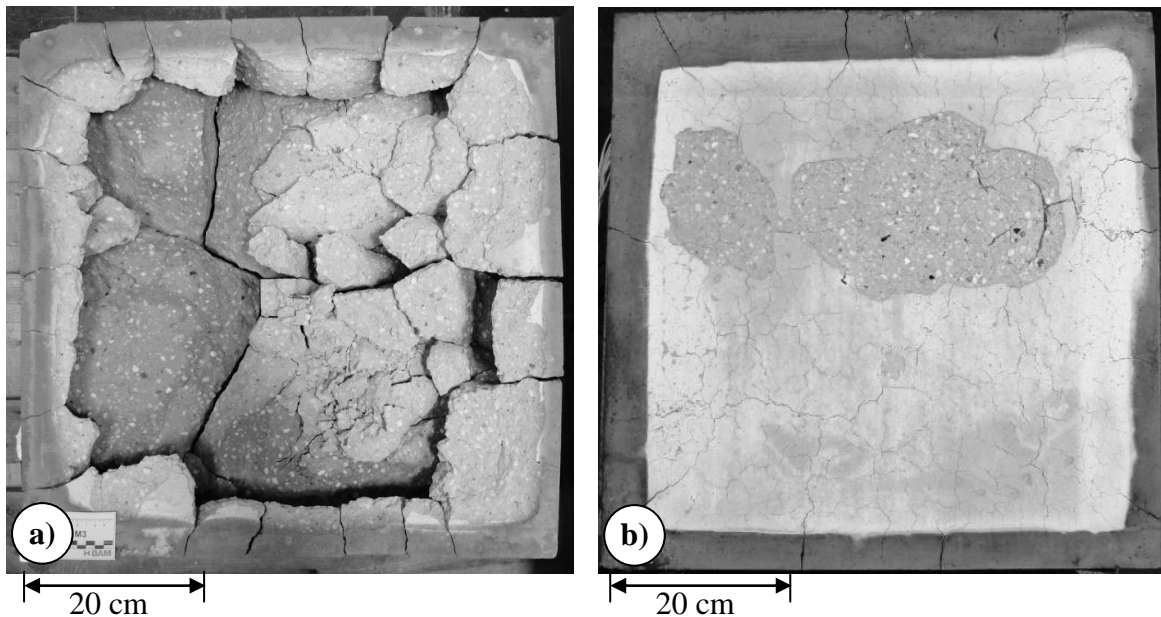


Abbildung 7. Probekörper aus hochfestem Beton nach einem Tunnelbrandversuch

- a) Die Probe ohne PP-Fasern zeigt tiefe Abplatzungen und durchgängige Risse.
- b) Die Probe mit 2kg/m^3 PP-Fasern weist nur wenige oberflächennahe Abplatzungen und Risse auf.

In der BAM wurde dafür ein Prüfstand (Abbildung 8) aufgebaut, mit dem das Brand- bzw. Hochtemperaturverhalten von Beton an Zylindern mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 300 mm untersucht werden kann [9].

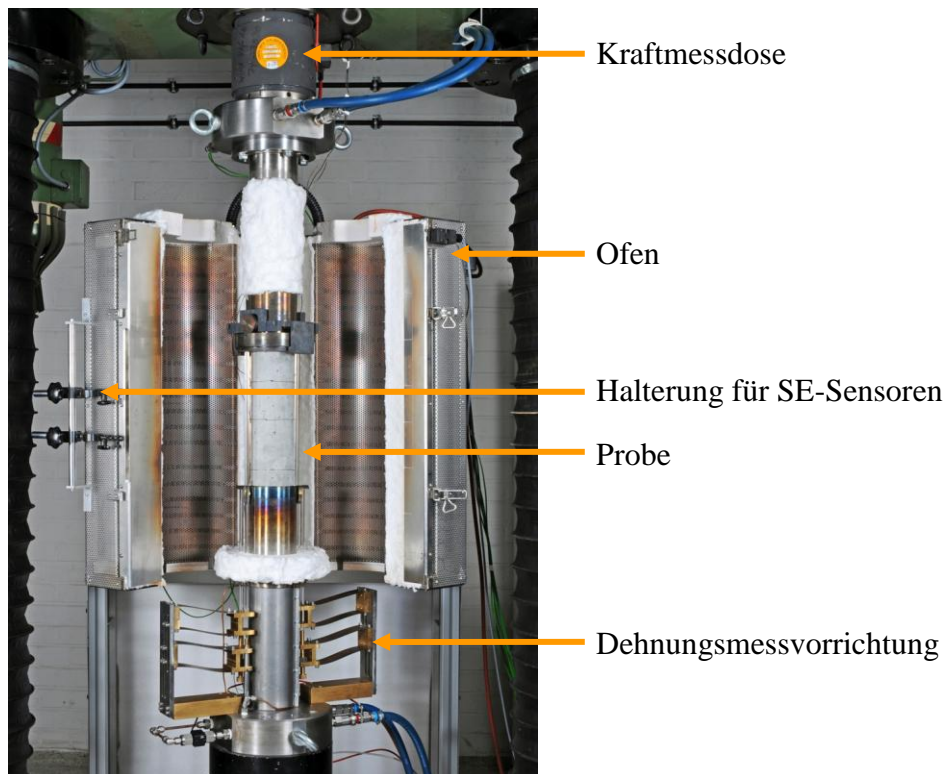


Abbildung 8. Prüfstand für die thermomechanische Belastung von Beton

Die Proben können gleichzeitig thermisch bis zu 750°C und mechanisch bis zu 200 N/mm² belastet werden. Die Anlage erlaubt die Aufzeichnung und Regelung der Temperatur, der mechanischen Belastung sowie der Verformung der Proben. Zur Messung der Schallemissionen können vier Sensoren über Wellenleiter aus zunderfreiem Stahl mit einem Durchmesser von 2 mm und einer Länge von 200 mm an die Probe gekoppelt werden.

Ein Beispiel für das Ergebnis der Schallemissionsmessung während der Erwärmung von hochfesten Betonen (HFB) mit und ohne PP-Fasern zeigt das Diagramm der Abbildung 9. Bei diesen Versuchen wurde eine geringe mechanische Grundlast konstant gehalten, während die Proben mit 1 K/min aufgeheizt wurden. Bei dieser geringen Aufheizrate sind auch bei Proben ohne Fasern keine Abplatzungen zu befürchten. Bisher wurde vermutet, dass durch das Schmelzen der PP-Fasern ab ca. 170°C Mikrokanäle frei werden, welche die Permeabilität des Betons erhöhen und für das verdampfende Wasser als Transportwege zur Verfügung stehen ([10], [11]). Die Ergebnisse der Schallemissionsmessungen an Proben mit PP-Fasern zeigen aber auch, dass ab 170°C die Schallemissionsaktivität höher ist als in Proben ohne Fasern. Dies legt den Schluss nahe, dass durch die Fasern eine zusätzliche Mikrorissbildung in der Zementsteinmatrix initiiert wird. Tatsächlich konnte durch systematische mikroskopische und röntgentomographische Untersuchungen nachgewiesen werden, dass die Fasern bzw. die nach dem Schmelzen zurückbleibenden Mikrokanäle durch ein Mikrorissystem verbunden sind [12].

Das Maximum der Schallemissionsaktivität tritt bei allen Proben bei ca. 600°C auf. Die Ursache hierfür ist die zur Herstellung der Betone verwendete quarzitische Gesteinskörnung. Bei einer Temperatur von ca. 575°C wird der stabilere α -Quarz in β -Quarz umgewandelt, womit eine Volumenvergrößerung verbunden ist. Die dadurch hervorgerufene Rissbildung im Beton ist an der in beiden Betonen ab 570°C deutlich ansteigenden Schallemissionsaktivität erkennbar.

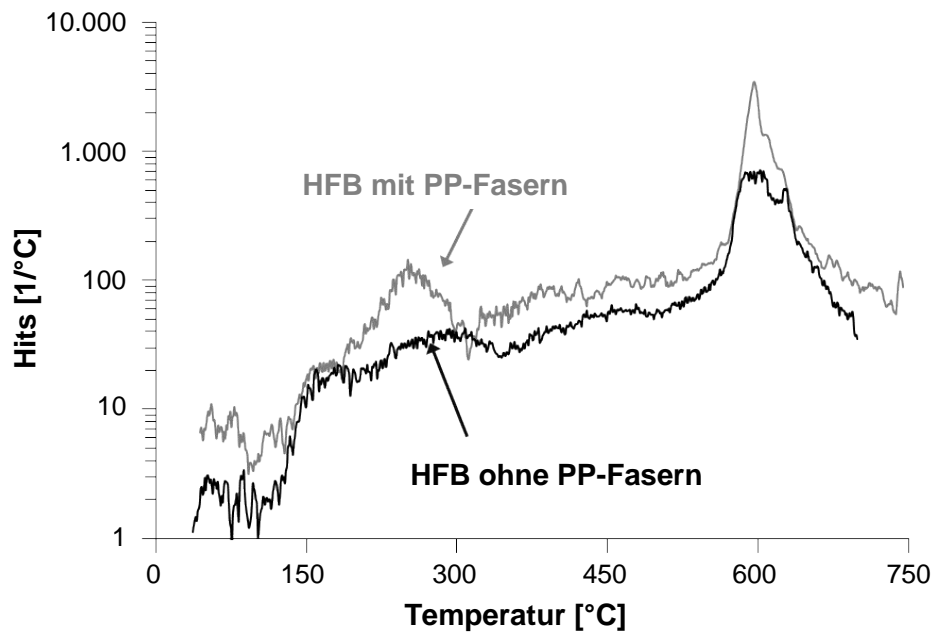


Abbildung 9. Schallemissionsaktivität bei der Erwärmung von hochfesten Betonen (HFB), nach [12]

Ermüdungsverhalten

Aus wirtschaftlichen und architektonischen Gründen werden tragende Elemente aus Beton immer schlanker bemessen und gestaltet. Dadurch verschiebt sich das Verhältnis der zu ertragenden statischen und dynamischen Lasten immer weiter in Richtung der dynamischen Anteile. Besonders hoch sind die dynamischen Lastanteile bei Fundamenten und Türmen von Windkraftanlagen. Obwohl das Ermüdungsverhalten von Betonen schon lange Gegenstand der Forschung ist, sind aufgrund des komplexen Materialverhaltens und der stetigen Entwicklung der Betontechnologie noch viele Fragestellungen offen, die für eine zuverlässige und wirtschaftliche Auslegung von Betonen unter Ermüdungsbeanspruchung beantwortet werden müssen. Des Weiteren wird nach Indikatoren bzw. Messverfahren gesucht, die ein Ermüdungsversagen zuverlässig und rechtzeitig ankündigen. Neben einer Erhöhung der Sicherheit der Bauwerke wäre damit auch eine Optimierung der Nutzungsdauer möglich.

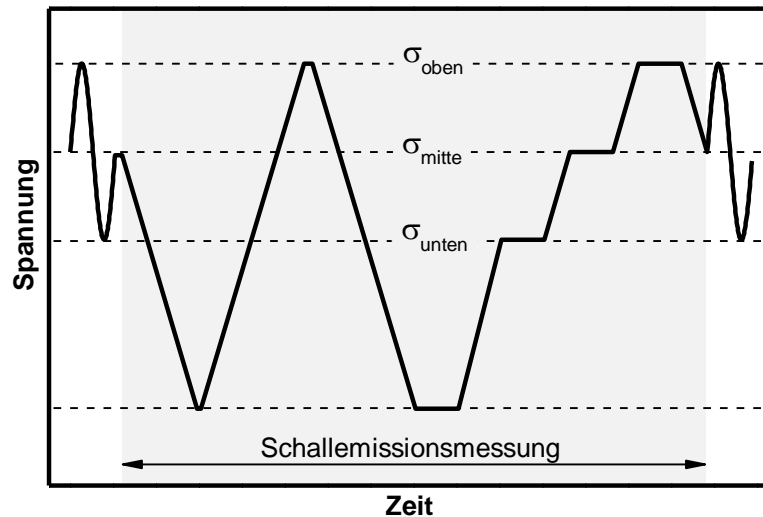


Abbildung 10. links: Probekörper mit Schallemissionssensoren zwischen den Druckplatten der Prüfmaschine
rechts: nicht maßstäbliche Darstellung eines Ausschnitts der Belastungsfunktion, nach [13]

Zahlreiche in der BAM durchgeführte Ermüdungsversuch an Betonproben haben gezeigt, dass sich insbesondere Schallemissionen als Indikator für die Schädigungsevolution eignen [13]. In diesen Versuchen wurden zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 300 mm (Abbildung 10) mit einer sinusförmigen Druckschwellbeanspruchung mit einer Frequenz von 5 Hz belastet. Die zyklische Belastung wurde regelmäßig durch lineare Lastrampen unterbrochen, während derer der statische E-Modul sowie auf verschiedenen Lastniveaus die Ultraschallgeschwindigkeiten bestimmt wurden. Die Aufzeichnung der Schallemissionen wurde auf die linearen Lastrampen beschränkt, da das während der zyklischen Belastung anfallende Datenvolumen nicht mehr handhabbar ist.

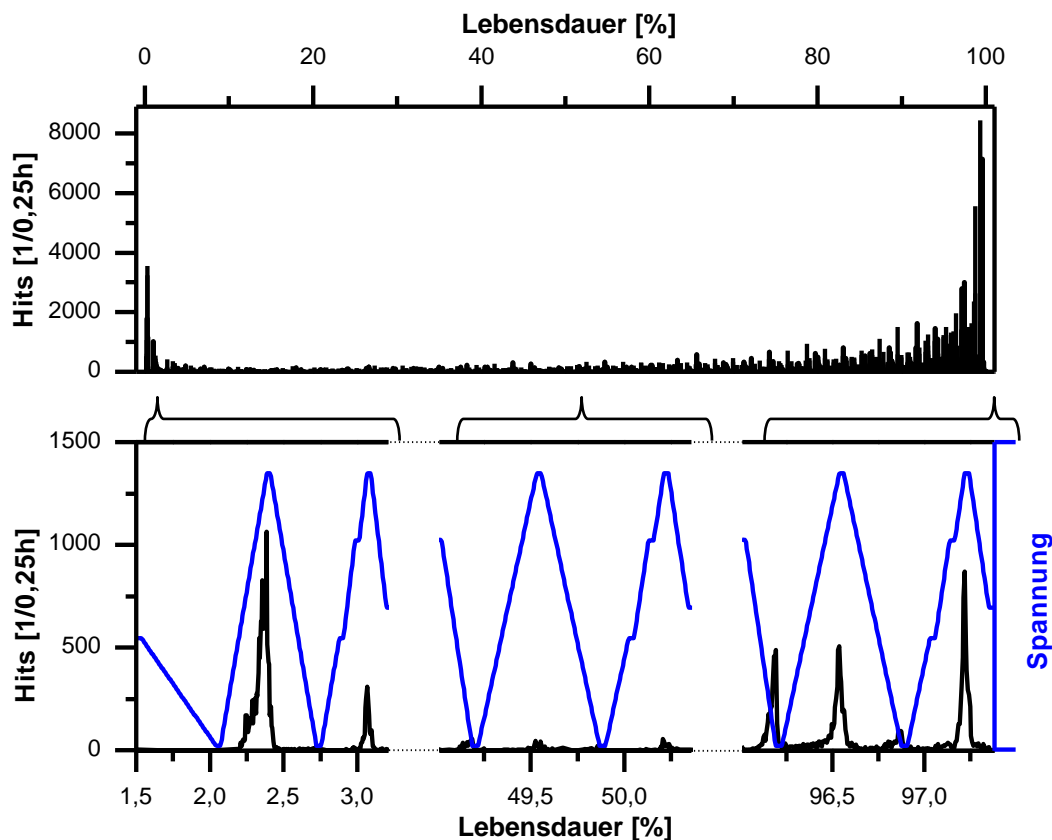


Abbildung 11. Schallemissionsaktivität während der linearen Lastrampen in einem Ermüdungsversuch, nach [10]

Abbildung 11 zeigt die Schallemissionsaktivität während der Lastrampen über die gesamte Lebensdauer einer bis zum Versagen belasteten Probe. Wie zu erwarten, ist die Schallemissionsaktivität während der ersten Belastung hoch. Schallemissionen treten hier nur während der Belastung auf und sind bei der zweiten Belastungsrampe deutlich geringer als während der ersten. Im Folgenden, über eine große Spanne der Lebensdauer, bleibt die Schallemissionsaktivität stabil auf einem niedrigen Niveau. Erst ab ca. 75 % der Lebensdauer steigt die Schallemissionsaktivität dann schnell an. In dieser Phase treten Schallemissionen schon während der Entlastung auf. Zudem ist die Schallemissionsaktivität während der zweiten Belastungsrampe höher als während der ersten, was auf eine schnell fortschreitende Schädigung schließen lässt. Dieses Verhalten kann genutzt werden, um die Versuche bei definierten Schädigungsgraden zu unterbrechen. Dadurch stehen Proben zur Verfügung, an denen das durch die Ermüdungsbeanspruchung entstandene Rissbild untersucht werden kann. Perspektivisch kann die Schallemissionsanalyse auf dieser Basis für die Überwachung von Tragwerken aus Beton genutzt werden.

Referenzen

- [1] Pirskawetz, S., Weise, F., Fontana, P.: Zwangsinduzierte Rissbildung bei erhärtendem Hochleistungsbeton, 52. DAfStb-Forschungskolloquium, Berlin 2011, ISBN: 978-3-9814281-0-0
- [2] Lura, P., J. Couch, Jensen, O. M. and Weiss, J.: Early-age acoustic emission measurements in hydrating cement paste: Evidence for cavitation during solidification due to self-desiccation, *Cement and Concrete Research* 39 (2009), 861-867.
- [3] Chotard, T.J., A. Smith, A., Boncoeur, M.P., Fargeot, D., Gault, C.: Characterisation of early stage calcium aluminate cement hydration by combination of non-destructive techniques: acoustic emission and X-ray tomography, *Journal of the European Ceramic Society* 23 (2003), 2211–2223
- [4] Schmidt, W., Brouwers, H.J.H., Lehmann, C., Kuehne, H.-C., and Meng, B.: Effect of PCE type on Setting, Hydration and Early Deformations of Cement Paste, Tenth International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete - Supplementary Papers (2012), 229-239
- [5] DAfStb-Richtlinie 2007: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb. Beuth-Verlag, Berlin, 2007.
- [6] Voland, K., Neueste Technik für bessere Autobahnen – Innovative Prüftechnik zur Verfolgung von Schädigungsprozessen infolge AKR. DAfStb-Doktorandenkolloquium, Kaiserslautern, 2010.
- [7] Weise, F., Voland, K., Pirskawetz, S., Meinel, D.: Analyse AKR-induzierter Schädigungsprozesse in Beton - Einsatz innovativer Prüftechniken, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jahrgang: 107 Heft: 12, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2012, DOI: 10.1002/best.201200049
- [8] DIN EN 1992-1-2: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Beuth-Verlag, Berlin, 12/2010.
- [9] Huisman, S.: Materialverhalten von hochfestem Beton unter thermomechanischer Beanspruchung. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton: Heft 590, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [10] Khoury, G. A.: Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanism and modelling criteria. *Magazine of Concrete Research* 60 (3) (2008), S. 189-204.
- [11] Zeiml, M., Leithner, D., Lackner, R., Mang, H. A.: How do polypropylene fibers improve the spalling behaviour of in-situ concrete?. *Cement and Concrete Research* 36 (2006), S. 929-942.
- [12] Pistol, K., Weise, F. und Meng, B.: Polypropylen-Fasern in Hochleistungsbetonen: Wirkungsmechanismen im Brandfall, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 107, Nr. 7 (2012), S. 476-483.
- [13] Thiele, M., Pirskawetz, S., Baeßler, M., Rogge, A.: Untersuchung der Schädigungsevolution in Beton unter Ermüdungsbeanspruchung mit Hilfe der Schallemissionsanalyse, 18. Kolloquium Schallemission (DGZfP-Proceedings), Wetzlar 2011, ISBN: 978-3-940283-37-5