

Anwendung der Schallemissionsanalyse bei zughafter Ermüdungsbeanspruchung eines scheibenförmigen Probekörpers aus Stahlbe- ton

Gerd MANTHEI¹, Manuel KOOB¹, Jens MINNERT¹
¹ THM Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen

Kontakt E-Mail: gerd.manthei@me.thm.de

Kurzfassung. In einem vom BMBF geförderten Forschungsprojekt wurden Schallemissions(SE)-Messungen während zughafter Ermüdungsbeanspruchungen an einem scheibenförmigen Probekörper aus Stahlbeton durchgeführt, um das Ermüdungsverhalten von eingelassenen Betondübel mit einer klothoidenförmigen Aussparung im Stahlbeton zu untersuchen. Dabei ging es hauptsächlich um die Verfolgung von Rissbildung und um die Lokalisierung der Risse. Die Ergebnisse der SE-Messungen zeigen, dass die SE-Aktivität von Beginn der dynamischen Belastung einsetzt. Die Ortungen sind wegen der begrenzten Ortungsgenauigkeit nicht auf Flächen auszumachen, sondern eher wolkenartig am linken und rechten Rand des Betondübel im Bereich der Aussparungen verteilt. Nach dem ersten Versuch konnten 9.132 SE-Ereignisse mit den Einsatzzeiten der Longitudinal- und Transversalwelle geortet werden. Die Lage der SE-Ereignisse lässt darauf schließen, dass durch den Formschluss zwischen Beton und dem Betondübel im Bereich der Aussparungen Spannungskonzentrationen auftreten, in denen sich unter Ermüdungsbeanspruchungen vermehrt Mikrorisse ausbilden.

1 Einleitung

Heutzutage befassen sich viele Bautätigkeiten mit der Instandsetzung bestehender Bauwerke (z.B. Gebäude, Brücken, Pfeiler). Diese werden in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Um über die Notwendigkeit von Art und Umfang einer Sanierungsmaßnahme entscheiden zu können, ist die Kenntnis über den Zustand des bestehenden Gebäudes unbedingt erforderlich. Die derzeitige Begutachtung von Stahlbetonkonstruktionen erstreckt sich im Allgemeinen auf die Sichtprüfung auf Beschädigungen der Strukturoberfläche ohne technische Hilfsmittel. Diese Art der Bewertung der Struktur ist notwendig, aber nicht immer ausreichend. Somit bleiben Schäden im Innern des Bauwerkes verborgen und können nur noch zu einem späteren Zeitpunkt nach der Sichtprüfung erkannt werden.

Die Verwendung zerstörungsfreier Prüfmethode kann Informationen über Schädigungsprozesse innerhalb der Struktur liefern. Die Schallemissionsprüfung (SEP) ist eine zerstörungsfreie Prüfmethode, mit der Materialschäden, während der Entstehung erkannt werden. Aufgrund von Rissbildung an Bauwerken unter Last werden elastische Wellen

freigesetzt (ähnlich wie bei Erdbeben) und von empfindlichen SE-Sensoren erfasst. Diese Sensoren sind in der Regel an der Oberfläche des Bauteils angekoppelt.

Mit der Untersuchung von Schallemission in Beton bzw. Stahlbeton wurde bereits sehr früh begonnen. Die Notwendigkeit, Brücken oder andere Bauten aus Stahlbeton auf ihren Schädigungsgrad hin zu untersuchen, stellt ein bedeutendes Anwendungspotential für zerstörungsfreie Prüfungen dar. Rüsç [1] untersuchte 1959 in ersten Versuchen an Beton-Druckprismen (100 mm × 150 mm) die Festigkeit, das Verformungsverhalten und die SE-Aktivität unter Kurzzeit- und Dauerstandsbelastung sowie unter zyklischer Belastung. Er stellte fest, dass der sogenannte Kaiser-Effekt bei Beton nicht gültig ist. Der Kaiser-Effekt besagt, dass das Auftreten von Schallemission eine Materialbeanspruchung erfordert, die höher sein muss als eine bereits früher einmal stattgefundenene Materialbelastung [2]. Es folgten in den 60er- und 70er-Jahren viele weitere Untersuchungen bei denen die SEA zur Detektion von Rissbildung in Beton eingesetzt wurden. Eine gute Übersicht über Literatur aus dieser Zeit gibt die von Drouillard angefertigte spezielle Bibliographie aus dem Jahr 1986 [3]. Einen guten Überblick über Anwendungen der letzten Jahrzehnte gibt der Artikel von Manthei [4]. Weitere wichtige Arbeiten über Schallemission in Beton sind in [5–10] publiziert. Ausziehversuche an Betonbewehrungsstäben wurden in [11] mit SE-Analyse untersucht. Der Fokus dieser Studie lag auf dem Materialverhalten von Beton unter statischer Belastung bis zum Versagen. Weiter interessante Anwendungen im deutschsprachigen Raum sind in [12–15] zu finden.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens am Fachbereich Bauwesen der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM) wird ein innovatives Hybridfachwerk mit geringem Materialeinsatz entwickelt [16,17]. Eingesetzt werden soll das Hybridfachwerk bei der Erstellung des Turms von Windkraftanlagen. Bei Windkraftanlagen wird der Turm hohen dynamischen Beanspruchungen durch Drehung des Rotors bei böigem Wind ausgesetzt. Bei einer nominellen Lebensdauer von 20 Jahren treten mehr als $2 \cdot 10^8$ Lastspiele auf, wodurch die Ermüdungsgrenze der eingesetzten Baustoffe erreicht werden kann. In diesem Vorhaben werden im Beton eingelassene Verankerungen von sogenannten Betondübeln bei dynamischer Zugbeanspruchung untersucht. Dabei werden in Versuchsserien Testkörper hinsichtlich Spannungen, Rissbildung, Grenztragkräfte und Ermüdungsverhalten untersucht. Kommt es zum Versagen der hochbeanspruchten Verankerung, so geht die Bildung von Mikrorissen der eigentlichen Schädigung im Innern der Struktur, z.B. im Übergangsbereich zwischen Beton und Bewehrungsstäben, voraus. Von daher war das Ziel der hier beschriebenen SE-Messungen, den Einsatz der Mikrorissbildung direkt zu messen und den Ort der SE-Ereignisse zu bestimmen. Anhand der Ortung der Risse wird das Voranschreiten der Schädigung untersucht. Änderungen der Schallgeschwindigkeit sollten in zusätzlichen Durchschallungen mit Ultraschallsignalen festgestellt werden; sie können ebenfalls auf Rissbildung hinweisen.

2 Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung

2.1 Beschreibung des Probekörpers

Abbildung 1 zeigt im linken Teilbild die Vorderansicht des Probekörpers mit der Lage des eingelassenen Betondübel und der vertikalen und horizontalen Bewehrungsstäben mit einem Durchmesser von 8 mm. Im rechten Teilbild ist die Seitenansicht des Probekörpers dargestellt. In den scheibenförmigen Probekörper (Probe VR4-2) aus Stahlbeton mit den Abmessungen 146 cm × 45 cm × 16 cm wurde ein 61 cm langer und 26 cm breiter Einbauteil aus handelsüblichem gewalzten Stahlblech mit einer Dicke von 20 mm aus S355JR etwa 20 cm in den Probekörper eingelassen. Der ganze Probekörper sitzt auf einer massiven

Stahlplatte zur Befestigung am unteren Stempel der Prüfmaschine, an die teilweise vertikale Bewehrungsstäbe angeschweißt waren. Zur Einleitung der Zugkraft (schwarzer Pfeil) der Prüfmaschine ragte das Einbauteil etwa 41 cm aus dem Probekörper heraus. Im einbetonierten Teil des Stahlblechs sind Aussparungen verschiedener Formen (z. B. Klothoidenform) herausgeschnitten worden. Durch das Einbetonieren erhärtet der Beton in den Aussparungen und es bildet sich so eine formschlüssige Verankerung im Beton, der sogenannte Betondübel. Zur Erhöhung der Tragfähigkeit werden zusätzlich Bewehrungsstäbe durch die Aussparungen geführt.

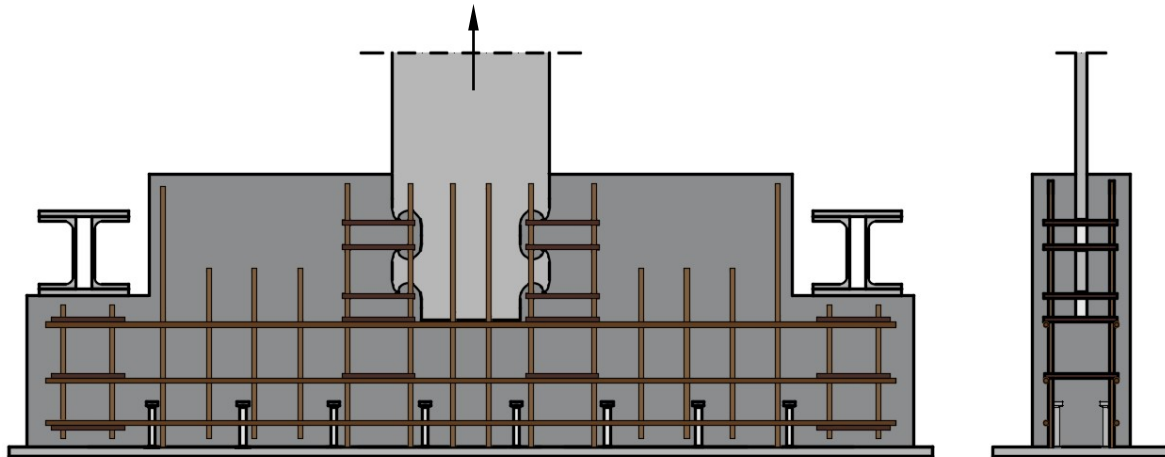


Abb. 1. Vorderansicht (links) und Seitenansicht (recht) des Probekörpers aus Stahlbeton mit der Lage des eingelassenen Betondübel (hellgrau) und der Lage der horizontalen und vertikalen Bewehrungsstäbe. Der Pfeil gibt die Richtung der Zugkraft an.

2.2 Beschreibung der Versuchseinrichtung zur SE-Messung

Zur dreidimensionalen Ortung der SE-Quellen wurden 16 SE-Sensoren an der Oberfläche des scheibenförmigen Probekörpers angebracht. Lediglich die Unterseite der Probe war nicht zugänglich, da sich hier die Stahlplatte zur Befestigung des Probekörpers am unteren Stempel der Prüfmaschine befand. Die Anordnung der SE-Sensoren ist in Abbildung 2 zu sehen. Jeweils sechs SE-Sensoren (rote Punkte) waren auf der Vorder- und Rückseite, zwei Sensoren an der Oberseite und jeweils ein Sensor an der linken und rechten Seite der Probe angebracht. Mit den noch zusätzlich angebrachten Ultraschallsendern (gelbe Punkte) konnten Durchschallungsmessungen längs (x-Richtung) und quer in y-Richtung an zwei bzw. drei Stellen des Prüfkörpers durchgeführt werden. Die Sensoren waren mit Blechen und Schrauben an dem Prüfkörper gehalten. Als Koppelmittel zwischen Sensoren und Oberfläche des Prüfkörpers diente ein hochzähes Vakuumfett, um die akustische Leitfähigkeit zu verbessern. Bei den SE-Sensoren handelt es sich um speziell für Beton entwickelte breitbandige SE-Sensoren mit einer Messfrequenz bis ca. 200 kHz. Für die Messung an diesem Prüfkörper konnte ein 16-Kanalgerät zur kombinierten Anwendung von Schallemission und Durchschallung (Hersteller: Fa. GMuG) herangezogen werden, das die Signale sehr hochfrequent mit einer Abtastfrequenz von 10 MHz und einer Auflösung von 16 bit digitalisierte. Die Signale wurden um 40 dB (Faktor 100) vorverstärkt und anschließend bandpassgefiltert. Die untere und obere Eckfrequenz des Bandpasses war auf 20 bzw. 200 kHz eingestellt.

Die Durchschallungsmessungen wurden zu Beginn und während der Haltephasen nach jeweils 10.000 Zyklen bei angehaltener Prüfmaschine wiederholt, um die zur Ortung benutzenden Schallgeschwindigkeiten zu bestimmen. Hierzu dienten ein breitbandiges Stufensignal von 1 μ s Länge und schmalbandige, geformte Sinussignale mit sieben Mittenfre-

quenzen zwischen 20 und 200 kHz. Zur Verbesserung der Signalgüte wurden bei jeder Messung bis zu 256 Stapelungen (d.h. Wiederholungen mit Aufsummation) durchgeführt. Da bei einer Stapelung die Signalamplitude proportional zu deren Anzahl zunimmt, die Amplitude inkohärenter Störsignale aber nur mit der Wurzel aus der Anzahl ansteigt, wird das Verhältnis zwischen Nutzsignal und Störuntergrund in unserem Fall auf das 16-fache angehoben.

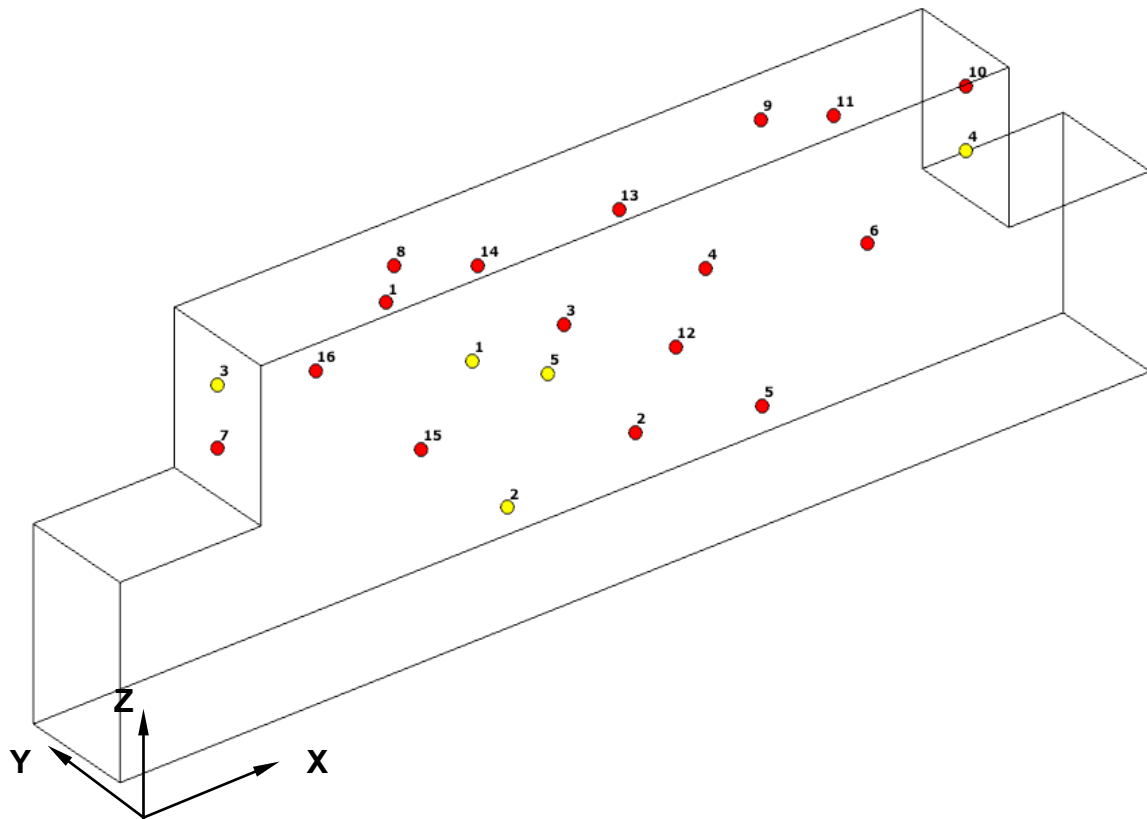


Abb. 2. Perspektivische Ansicht des plattenförmigen Probekörpers aus Stahlbeton mit der Lage der 16 SE-Sensoren (rote Punkte) und 5 Ultraschallsendern (gelbe Punkte). Der Ursprung des Koordinatensystems liegt in der linken unteren Ecke der Probe.

Bei dem Versuch wurde zusätzlich zu den übrigen Messsystemen, wie Dehnungsmessstreifen und induktive Wegaufnehmer, ein optisches Messsystem (LIMESS) installiert, welches mit Hilfe von Highspeed-Kameras Verformungen und Schädigungen optisch erfasste.

2.3 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde in mehreren Phasen vorgenommen. Nach dem Aufbringen einer statischen Vorlast von 80 kN erfolgte die dynamische Belastung des Probekörpers in einem kraftgeregelten Auszugversuchs. Abbildung 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Zugkraft (schwarze Kurve) und des vertikalen Wegs (rote Kurve) der Prüfmaschine. In der kleinen Abbildung oben links in Abbildung 3 ist der Verlauf der dynamischen Belastung mit einer Frequenz von 8 Hz dargestellt. Während eines Schwingenspiels schwingt die Ausschlagskraft mit einer Amplitude von ± 36 kN um eine mittleren Zugkraft von 44 kN. Somit beträgt die obere und untere Zugkraft 80 kN bzw. 8 kN. Insgesamt wurden 10 Belastungszyklen mit jeweils 10.000 Schwingenspielen durchgeführt. Nach einem Zyklus folgte eine Haltephase von einigen Minuten bei 8 kN. Während der Haltephasen wurden Durchschallungsmessungen durchgeführt. Nach 100.000 Schwingenspielen wurde eine Resttragfähigkeit von ca. 161 kN bei einer geringen Belastungsgeschwindigkeit von 0,005 bis 0,025 mm/min gemessen.

Weiterhin ist zu erkennen, dass während der dynamischen Belastung der Weg der Prüfmaschine recht konstant bei ca. 1 mm bleibt. Erst am Ende des Versuchs, bei der Bestimmung der Resttragfähigkeit, steigt er sprunghaft auf 30 mm an. Der Versuch dauerte insgesamt ca. 7 Stunden. Schallemission wurde bis zur vollständigen Entlastung der Probe gemessen.

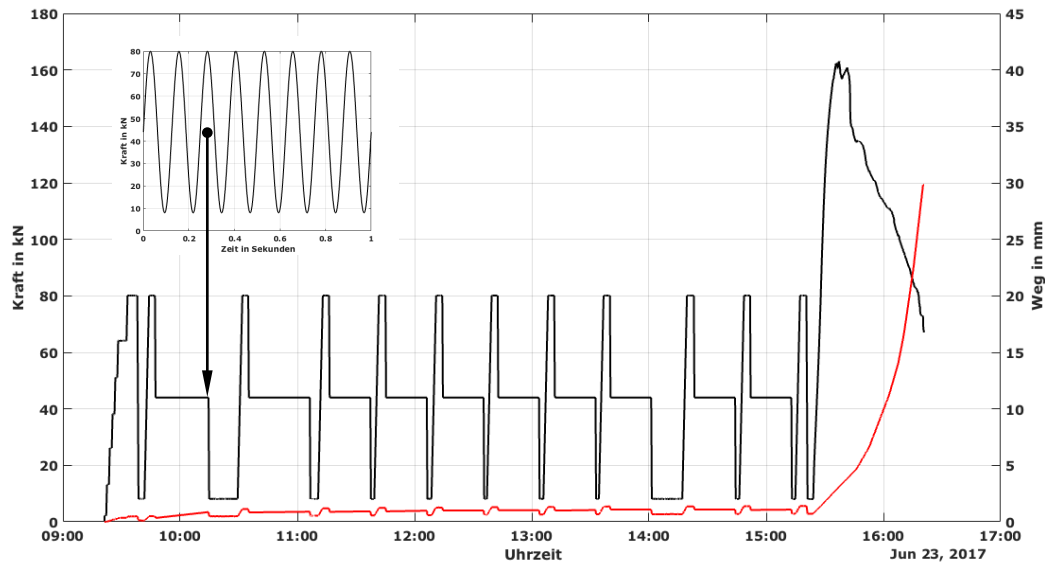


Abb. 3. Kraft (schwarze Kurve) und Weg (rote Kurve) gegenüber der Zeit. Oben links: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der dynamischen Zugbelastung mit 8 Hz Schwingfrequenz bei einer mittleren Zugkraft von 44 kN.

3 Versuchsauswertung

Der Schwerpunkt der Auswertung lag in der dreidimensionalen Ortung der SE-Ereignisse zur Bestimmung der räumlichen Verteilung der Risse. Dazu wurde ein von der Fa. GMuG entwickeltes automatisches Ortungsprogramm verwendet. Das Verfahren nutzt dazu sicher erkannte Longitudinal(L)- und Transversal(T)welleneinsatzzeiten zur Lokalisation der SE-Ereignisse. Eine Ortung war gültig, wenn der berechnete Ortungsfehler unterhalb der Fehlergrenze von 5 cm lag und das Ereignis mit mehr als fünf L- und T-Welleneinsätzen zusammen geortet wurde. Der berechnete Ortungsfehler ist das Residuum, also der Mittelwert der Abweichungen zwischen gemessenen und theoretischen Einsätzen. Ereignisse, die diese Kriterien nicht erfüllten wurden verworfen. Systematische Untersuchungen zum Ortungsfehler zeigen, dass der wirkliche Ortungsfehler im Bereich von einigen Zentimetern liegt [1].

Abbildung 4 stellt die an allen 16 Kanälen gemessenen Signale eines Ereignisses im Zeitausschnitt von ca. 1,6 ms dar. Am Ende der Signalspur ist das Maximum in Volt angegeben. Die automatisch bestimmten und zur Ortung herangezogenen Einsätze der L- und T-Welle sind oberhalb des Signalzuges durch einen vertikalen Strich markiert. Die nach der Ortung berechneten Ankunftszeiten der L- und T-Welle sind unterhalb des Signalzuges durch eine gestrichelte Linie markiert. Das gezeigte Ereignis wurde mit zehn L- und zwei T-Welleneinsatzzeiten zusammen geortet. Zur Ortung wurden die gemessene L-Wellengeschwindigkeit von 3,6 mm/μs und T-Wellengeschwindigkeit von 2,1 mm/μs verwendet. Das Ereignis liegt etwa in der Mitte der Vorderseite der Probe und hat die Koordinaten $x = 61,1$ cm, $y = 2,8$ cm und $z = 24,6$ cm. Der berechnete Ortungsfehler liegt bei 2,7 cm. Die gute Übereinstimmung zwischen den markierten und berechneten Einsatzzeiten lässt erwarten, dass auch der wirkliche Ortungsfehler bei diesem Ereignis im Bereich des berechneten Fehlers liegt.

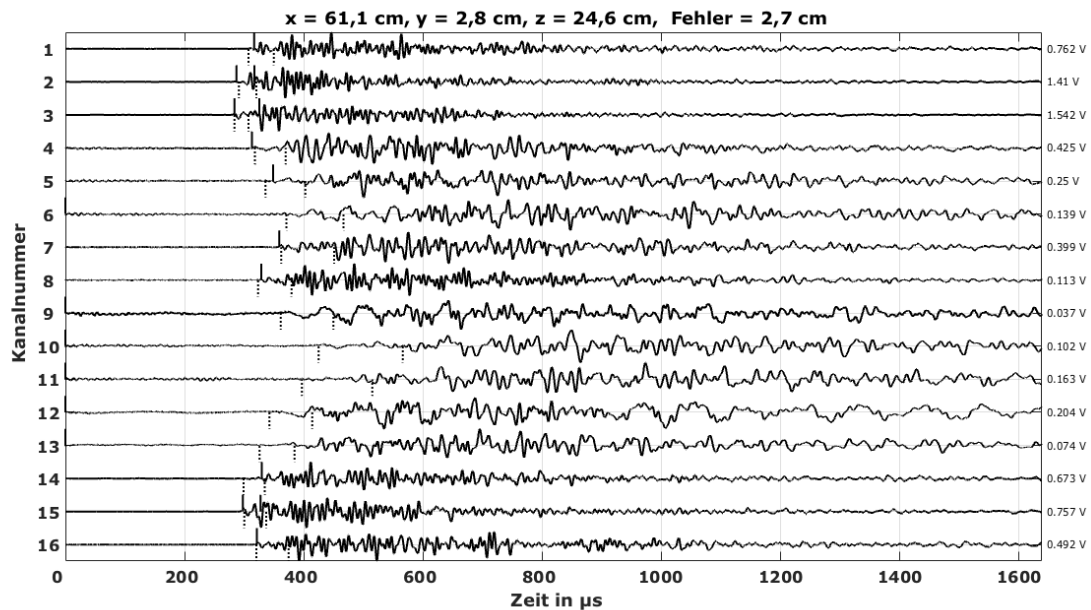


Abb. 4. Signale eines Ereignisses aus der Mitte der vorderen Oberfläche der Probe an allen 16 Kanälen. Das Ereignis wurde mit den zehn markierten L- und zwei T-Einsätzen zusammen geortet.

4 Ergebnisse der SE-Messungen

Der zeitliche Verlauf von kumulierter Zahl der georteten Ereignisse (rote Kurve) zusammen mit der Zugkraft der Prüfmaschine (schwarze Kurve) ist in Abbildung 5 gezeigt. Die Schallemissionsaktivität setzt unmittelbar mit der dynamischen Belastung ein und nimmt während des Versuchs zunächst stetig zu. Ab Versuchsmitte (ca. 12:30 Uhr) nimmt die Zahl der Ortungen leicht ab, was sicher darauf zurückzuführen ist, dass die Schädigung der Probe zugenommen hat und klaffende Risse die Schallausbreitung zu einigen Sensoren behindern. Jedoch ist ein leichter Anstieg der Ortungsrate am Ende des Versuchs bei der Bestimmung der Resttragfähigkeit zu erkennen. Aufgrund der Durchschallungsmessungen in den Haltephasen konnten keine SE-Messungen durchgeführt werden.

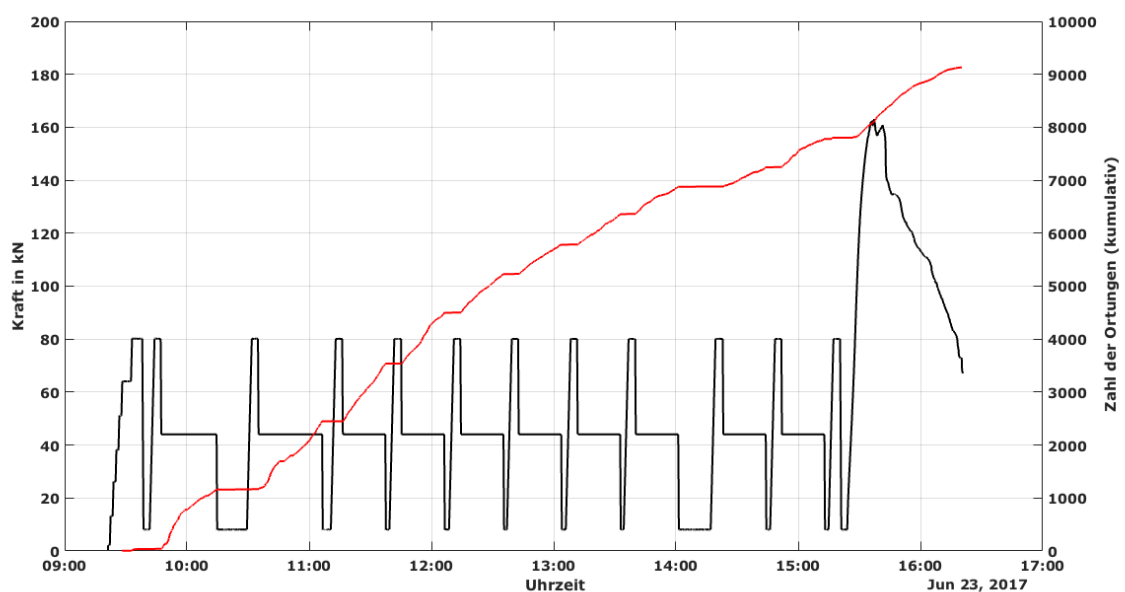


Abb. 5. Zeitlicher Verlauf von kumulierter Zahl der Ortungen (rote Kurve) und Zugkraft (schwarze Kurve) während des Versuchs an Probe VR4-2.

Abbildung 6 zeigt die Lage der Ereignisse in Projektion auf die drei Koordinatenebenen. Zu sehen ist jeweils mit der x-z-Ebene (oben links) die Vorderansicht, mit der x-y-Ebene (links unten) die Aufsicht von oben und die y-z-Ebene (rechts oben) die Seitensicht von links wieder. Die Lage der SE-Sensoren und Ultraschallsendern ist wieder durch rote bzw. gelbe Punkte mit Zahlen gekennzeichnet. Das Koordinatensystem ist so orientiert, dass die z-Achse vertikal verläuft. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt in der unteren linken Ecke der Probe (vergleiche Abb. 2).

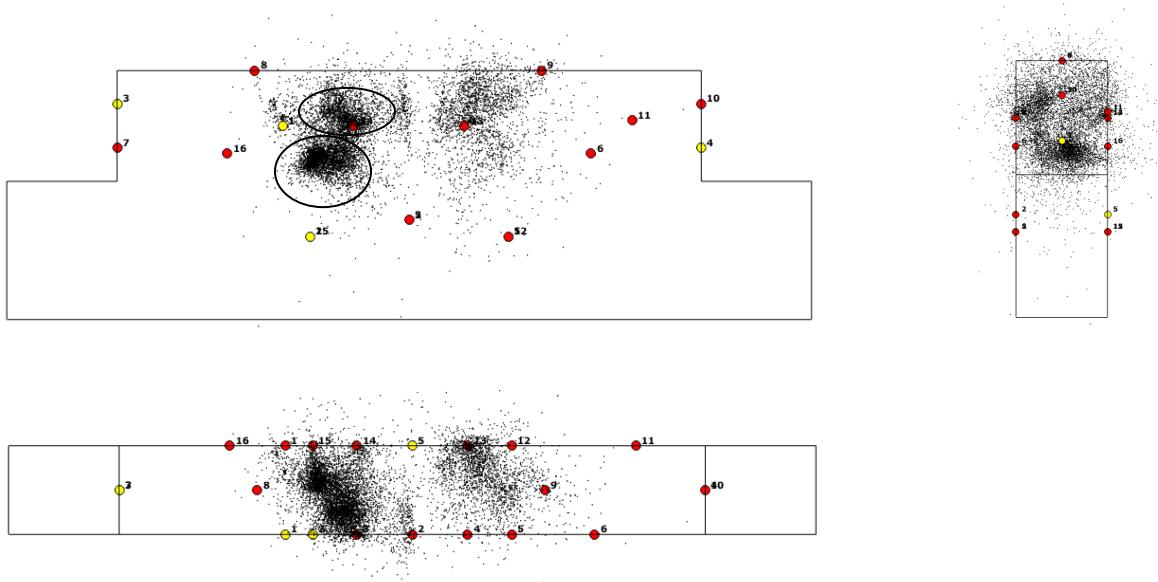


Abb. 6. Lage der georteten 9.132 Ereignisse, die bei dem Versuch an dem Probekörper aus Stahlbeton registriert wurden, in Projektion auf die drei Koordinatenebenen. Die Ortung wurde mit den L- und T-Welleneinsätzen zusammen durchgeführt. Die roten Punkte mit Zahlen geben die Lage der 16 SE-Sensoren an. Die Lage der Ultraschallsender ist durch gelbe Punkte markiert.

Insgesamt konnten über die gesamte Versuchsdauer von ca. 7 Stunden 9.132 Ereignisse gültig geortet werden. In Abbildung 6 treten diese Ortungen wolkenartig hauptsächlich im Randbereich des eingelassenen Betondübels auf. Auffällig ist, dass etwa drei Viertel (etwa 6.700) der Ereignisse am linken Rand in zwei Ortungsschwerpunkten (Ovale in Teilbild links oben) verteilt liegen. Die Vorderansicht (x-z-Ebene) aus Abbildung 6 ist in einer vergrößerten Darstellung in Abbildung 7 im Koordinatenausschnitt von $x = 40$ cm bis $x = 100$ cm zusammen mit der Kontur des Betondübels zu sehen. Aus dieser Abbildung ist zu entnehmen, dass die Ortungsschwerpunkte aus den Vergusstaschen der klothoidenförmigen Aussparungen des Betondübels stammen. Die Ortungen sind allerdings nicht auf Flächen auszumachen, sondern sind eher wolkenartig verteilt.

Abbildung 8 zeigt ein Foto des Probekörpers nach dem Versuch zusammen mit den Ortungen (grüne Punkte) in Projektion auf die Rückseite. Dadurch liegen jetzt die beiden auffälligen Ortungsschwerpunkte auf der rechten Seite des Probekörpers. Da die vielen Ereignisse die Rissstruktur verdecken, ist oben links in Abbildung 8 zur besseren Übersicht der Probekörper alleine verkleinert dargestellt.

Das verkleinerte Foto oben links zeigt im Bereich des Lasteintrages am Betondübel deutliche Ausbrüche des Betons, die weit über die Breite des Betondübels hinausgehen und ca. 15 cm in den Probekörper hineinragen. Diese Ausbrüche werden gut durch Ortungen belegt. Nach Aussage der Schallemission setzt sich jedoch die geschädigte Zone noch unterhalb der Ausbrüche, etwa bis zum unteren Ende des Betondübels, fort.

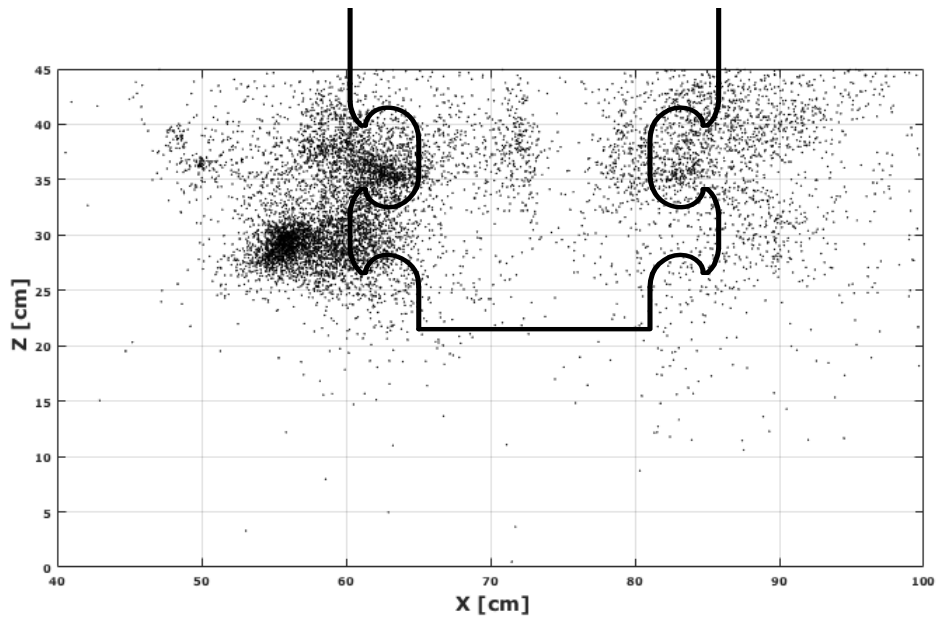


Abb. 7. Lage der georteten Ereignisse in einer vergrößerten Darstellung der Vorderseite im Bereich von $x = 40$ cm bis $x = 100$ cm zusammen mit der Kontur des einbetonierten Teils des Betondüfels.

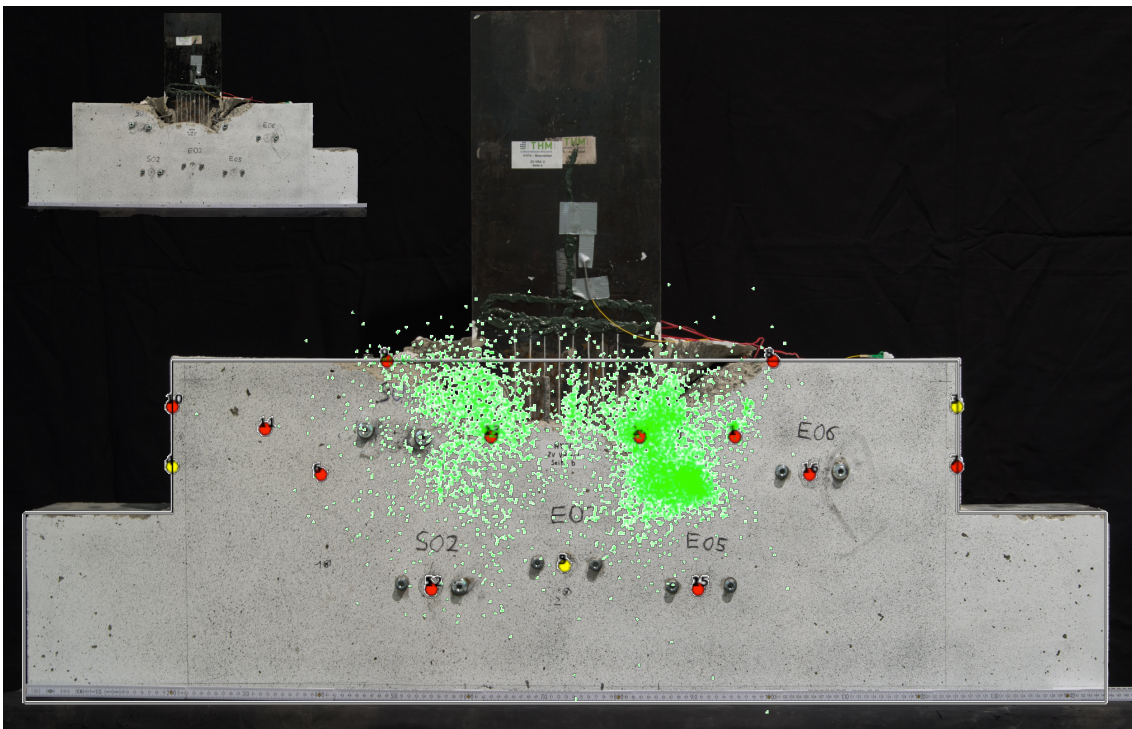


Abb. 8. Lage der georteten Ereignisse (grüne Punkte) in Projektion auf die Rückseite des Probekörpers zusammen mit dem Foto des Probekörpers nach dem Versuch (nochmals verkleinert oben links).

Zur weiteren Überprüfung der SE-Ergebnisse wurden die lokalisierten SE-Ereignisse mit dem Ergebnis einer nichtlinearen FE-Berechnung der Verankerung im Beton verglichen. Die verbleibende Zugfestigkeit des Betons nach der dynamischen Belastung ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Zugfestigkeit wird in Projektion auf einen vertikalen Querschnitt in der Mitte der Betondübelverankerung in einer perspektivischen Ansicht dargestellt. In dieser Abbildung gibt die rote Farbe ungestörte Bereiche im Beton an. Wohingegen in den blauen Bereichen die Tragfähigkeit des Betons deutlich abnimmt. Das bedeutet, dass in diesen Zonen die Betonkonstruktion stark geschädigt ist und keine Zugkraft mehr übertragen werden kann. Im Vergleich zu den Ergebnissen der SE-Messungen trat der Hauptteil der SE-Ereignisse im hohen Schaden auf, wo die Tragfähigkeit sehr gering ist (blaue Bereiche in Abb. 9). Gemäß der Ortungsergebnisse setzt sich die geschädigte Zone unterhalb der Klothoidenaussparung etwa bis zum unteren Ende des Betondübels fort.

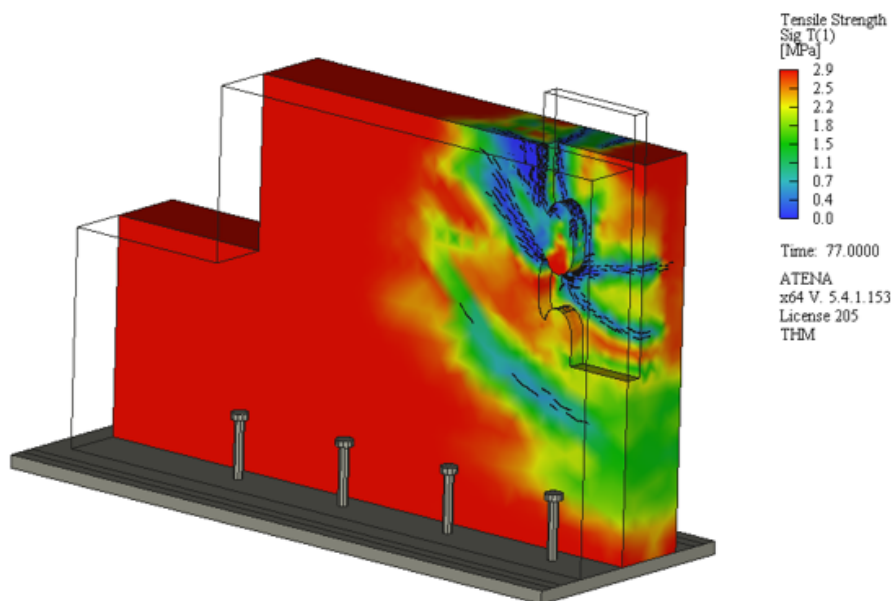


Abb. 9. Perspektivische Ansicht der nichtlinearen FE-Berechnung der Zugfestigkeit im vertikalen Querschnitt in der Mitte der Betondübelverankerung. Die rote Farbe markiert ungestörte Bereiche im Beton; während in den blauen Bereichen die Tragfähigkeit des Betons deutlich abnimmt.

5 Zusammenfassende Diskussion

Die hier beschriebenen SE-Messungen zeigen, dass Rissbildung bei dynamisch beanspruchten Probekörpern aus Stahlbeton verfolgt werden kann. Diese Rissbildung wird durch die Schallemission empfindlich angezeigt. Dabei ging es hauptsächlich um die Lokalisierung der Risse. Die Ergebnisse der SE-Messungen zeigen, dass die SE-Aktivität von Beginn an der dynamischen Belastung einsetzt. Die Ortungen sind wegen der begrenzten Ortungsgenauigkeit nicht auf Flächen auszumachen, sondern sind eher wolkenartig am linken und rechten Rand des Betondübels im Bereich der Aussparungen verteilt. Die Lage der SE-Ereignisse lässt darauf schließen, dass durch den Formschluss zwischen Beton und dem Betondübel im Bereich der Aussparungen Spannungskonzentrationen auftreten, in denen sich unter Ermüdungsbeanspruchungen vermehrt Mikrorisse ausbilden.

Danksagung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen werden im Rahmen eines Forschungsprojekts an der Technischen Hochschule Mittelhessen in Zusammenarbeit mit dem Oberhessischen Spannbetonwerk GmbH (Nidda) entwickelt. Das Projekt (FKZ 13FH012IX4) wird im Rahmen des Programmes „Forschung an Fachhochschulen“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert, denen an dieser Stelle herzlichst gedankt sei.

Referenzen

- [1] Rüsç, H., Physikalische Fragen der Betonprüfung, Zement-Kalk-Gips, Vol. 12, No. 1, Bauverlag GmbH, Wiesbaden, 1959, S. 1–9.
- [2] Kaiser, J., Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen bei Zugversuchen, Dissertation at the TU München, 1950, Germany
- [3] Drouillard, T.F., AE Literature – Concrete, JAE, Vol. 5, No. 2, 1986, S. 103–109.
- [4] Manthei, G., Anwendung der Schallemissionsanalyse im Bauwesen, in: Minnert, J. (Hrsg.), 13. Giessener Bauforum, Shaker Verlag Aachen, 2016, S. 19–38.
- [5] Schechinger, B., Schallemissionsanalyse zur Überwachung der Schädigung von Stahlbeton, Dissertation at ETH Zurich, 2005, Switzerland.
- [6] Shiotani, T., Luo, X., Haya, H., Damage Diagnosis of Railway Concrete Structures by Means of One-Dimensional AE Sources, Journal of Acoustic Emission, Vol. 24, 2006, S. 205–214
- [7] Grosse, C., Ohtsu, M., Acoustic Emission Testing, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [8] Manthei, G., Koob, M., Minnert, J., Acoustic Emission Measurements During a Tensile Fatigue in Reinforced Concrete, 33rd European Conference on Acoustic Emission Testing, 12.–14. September, Senlis, France, 2018.
- [9] Walther, M., Koob, M., Manthei, G., Minnert, J., Application of Acoustic Emission Analysis for Evaluation of Static and Dynamic Experiments, 5th International fib Congress, 7.–11. Oktober 2018, Melbourne, Australien, ISBN: 978-1-877040-14-6.
- [10] Manthei, G., Koob, M., Walther, M., Minnert, J., Moriya, H., Acoustic Emission Measurements During Three-Point Bending Fatigue Test on a Prestressed Reinforced Concrete Railroad Sleeper, Progress in Acoustic Emission XIX, Proc. Intern. Acoustic Emission Conference, Sapporo, Japan, 2018, S. 1–9.
- [11] Finck, F., Untersuchung von Bruchprozessen in Beton mit Hilfe der Schallemissionsanalyse, Dissertation at the University of Stuttgart, 2005, Germany.
- [12] Pirskawetz, S., Hüsken, G., Gründer, K.-P., Kadoke, D., Analyse der Schadensmechanismen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mittels zerstörungsfreier Prüftechniken, 21. Kolloquium Schallemission, Fulda, Berichtsband 159 der DGZfP, 2017.
- [13] Pirskawetz, S., Kadoke, D., Gründer, K.-P., Unger, J.F., Überwachung von Stahlbetonbrücken – Ein Modellprojekt, 22. Kolloquium Schallemission, Karlsruhe, Vortrag 1, 2019.
- [14] Walther, M., Manthei, G., Minnert, J., Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Überwachung von Spannbetonschwellen unter statischer und dynamischer Belastung, 22. Kolloquium Schallemission, Karlsruhe, Vortrag 18, 2019.
- [15] Thiele, M., Pirskawetz, S., Baeßler, M., Rogge, A., Untersuchung der Schädigungsevolution in Beton unter Ermüdungsbeanspruchung mit Hilfe der Schallemissionsanalyse, 18. Kolloquium Schallemission, Wetzlar, Berichtsband 131 der DGZfP, 2011.
- [16] Koob, M., Wolff, D., Minnert, J., Innovative Hybrid-Tower for Onshore Wind Energy Plants, CPI - Concrete Plant International, Edition 1/2015, pp 152–156.
- [17] Koob, M., Minnert, J., Untersuchungen einer Betondübelverankerung unter dynamischen Einwirkungen für den Einsatz bei Windenergieanlagen, Proceedings 21. DAST-Kolloquium, Kaiserslautern, Germany, 2018, pp 146–151.