

Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Überwachung von Spannbetonschwellen unter statischer und dynamischer Belastung

Marcel WALTHER¹, Gerd MANTHEI¹, Manuel KOOB¹, Jens MINNERT¹
¹ Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen

Kontakt E-Mail: marcel.walther@bau.thm.de

Kurzfassung. An der Technischen Hochschule Mittelhessen werden Schallemissions(SE)messungen an Versuchskörpern aus Spannbeton durchgeführt, um die Schädigung in den Betonbauteilen unter statischer und dynamischer Belastung zu untersuchen. Die SE-Messungen wurden während Dreipunkt-Biegeversuchen an vorgespannten Stahlbetonschwellen zur Verfolgung des Rissfortschritts durchgeführt. Dabei wurden die Spannbetonschwellen in einer ersten Phase statisch vorbelastet und in einer zweiten Phase bis zum Erreichen der Ermüdungsfestigkeit dynamisch belastet. Die Ergebnisse der Messungen zeigen einen unmittelbaren Einsatz der SE-Aktivität nach Beginn der dynamischen Belastung. Bereits bei niedrigen zyklischen Belastungen zeigen die Ortungen den Beginn der Schädigung des Probekörpers an. Eine Vielzahl der lokalisierten SE-Ereignisse identifizieren eine vertikale makroskopische Rissfläche in der Mitte der Spannbetonschwelle. Parallel zur Hauptrissebene stellten sich zwei weitere vertikale Seitenrissebenen ein, die sich in etwa im gleichen Abstand zur Hauptrissebene befinden. Die optische Beurteilung des Risszuwachses bei vorgespannten Betonbauteilen ist, aufgrund des überdrückten Betonquerschnitts, meistens erst zeitlich verzögert möglich. Daher bietet die Schallemissionsanalyse eine gute Möglichkeit die Belastungsversuche von vorgespannten Betonbauteilen hinsichtlich der inneren Rissbildung zu überwachen.

1 Einleitung

Die Basis des Gleisbaus in Deutschland sowie in anderen Ländern bilden Spannbetonschwellen auf einem verdichteten Schotteroberbau. Stahlbeton hat sich hierbei als Baustoff für den Schwellenbau in den letzten Jahrzehnten bewährt. Es kommt aber immer wieder vor, dass korrekt nach dem Stand der Technik hergestellte Bahnschwellen Schäden aufweisen, deren Ursachen nicht eindeutig sind. Mit den Anforderungen aus Geschwindigkeiten von bis zu 280 km/h und Achslasten von 25 t sind Bahnschwellen über ihre Lebensdauer großen dynamischen Belastungen ausgesetzt. Im Schienennetz der Deutschen Bahn sind derzeit ca. 80.000.000 Schwellen verbaut, davon sind ca. 2 % schadhaft. Rund 1,4 Mio. Schadschwellen fallen auf Betonschwellen zurück, die mit Spannstahl im direkten Verbund hergestellt wurden [1]. Ein Großteil dieser geschädigten Schwellen weist Längsrisse entlang des Spannstahls auf, die nicht auf Materialschäden zurückzuführen sind. Daher ist unklar, ob die bei diesen Schwellen eingehaltenen Regeln der Technik zum Verbundverhalten (u.a. die Vorgabe zur Einhaltung der Randabstände) für diese hochbelasteten Bauteile ausreichend sind.



Die Feststellung, Beurteilung sowie Instandsetzung von Rissen in Betonschwellen bis hin zum Einzelschwellenaustausch ist sehr aufwendig und kostenintensiv. Daher wird mit der Schallemissionsanalyse (SEA) die Ermüdungsrisssbildung in Spannbetonschwellen untersucht, um einen besseren Einblick in das Schadverhalten zu erhalten.

In der vorliegenden Arbeit wird die Rissbildung einer vorgespannten Stahlbetonschwelle während eines statisch und dynamisch belasteten Dreipunkt-Biegeversuchs angelehnt an DIN EN 13230-4 [2] durch Schallemissionsmessungen aufgezeichnet und das Risswachstum ausgewertet. Schwierigkeiten bei der Anwendung von SE-Messungen an Stahlbetonbauteilen sind die Inhomogenität des Materials, die Dämpfung hoher Frequenzen und die Komplexität der Strukturen.

2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Beschreibung des Versuchskörpers

Bei dem durchgeführten Bauteilversuch handelt es sich um einen Dreipunkt-Biegeversuch einer 2,40 m langen Spannbeton-Weichenschwelle. Der rechteckige Querschnitt hat eine Höhe von 0,215 m und auf der Unterseite eine Breite von 0,30 m und verläuft nach oben hin leicht konisch. Die Schwelle ist durch 12 Spannstäbe $\varnothing 8$ im sofortigen Verbund vorgespannt, deren Verteilung über den Querschnitt ist in Abbildung 1 dargestellt.

Bei Spannbetonbauteilen wird der Bewehrungsstahl unter Verwendung von externen Widerlagern vorspannt, im Anschluss erfolgt der Betoniervorgang. Ist das Bauteil ausgehärtet, wird der Spannstahl entspannt und die aufgebrachte Zugspannung überträgt sich direkt über Verbundkräfte in den Beton. Durch das „Zusammendrücken“ des Betonquerschnitts können schlankere Tragwerke konstruiert werden, ohne die zulässigen Grenzen der Verformung zu überschreiten.

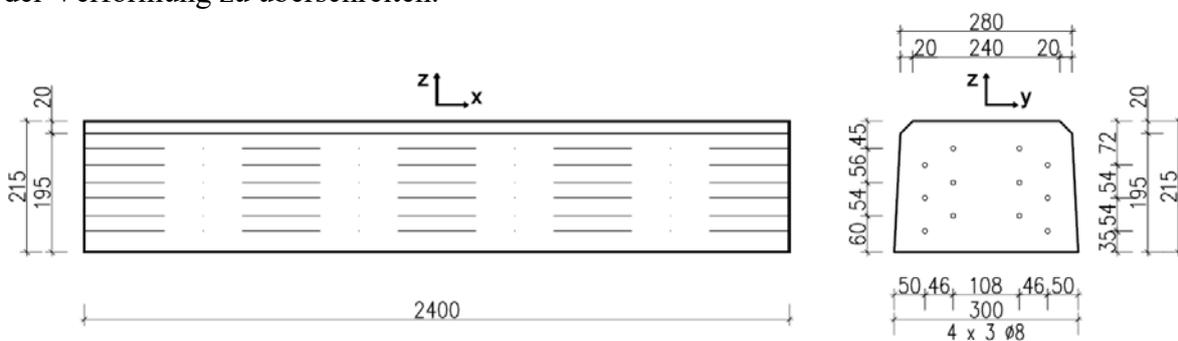


Abb. 1. Abmessungen der Spannbetonschwelle in mm

Der Dreipunkt-Biegeversuch der Spannbetonschwelle wurde in einer servo-hydraulischen Universalprüfmaschine (max. Prüfkraft: statisch ± 2 MN, dynamisch $\pm 1,6$ MN) mit einem Auflagerabstand von 2,0 m und einem Lastrollenabstand von 1,0 m durchgeführt. Abb. 2 zeigt den Prüfstand mit den bereits installierten Schallemissionssensoren an der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM) in Gießen.

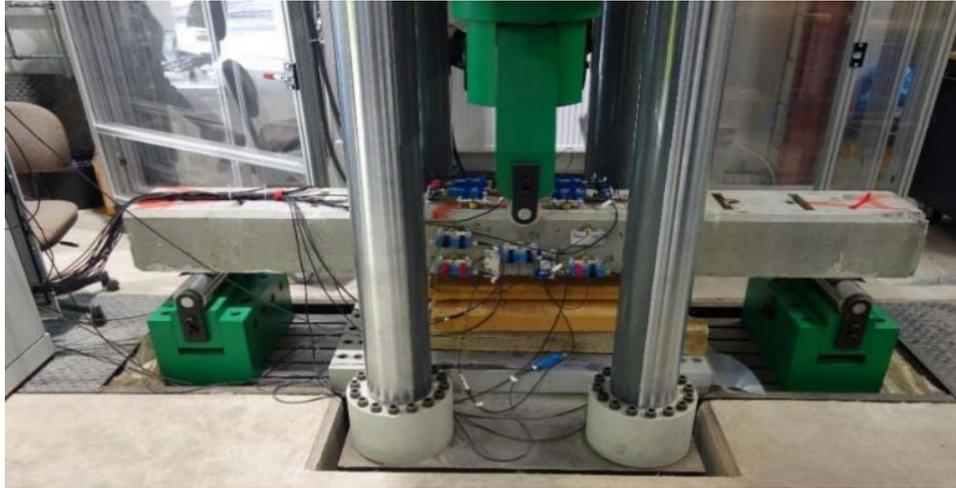


Abb. 2. Spannbetonschwelle im Prüfstand an der THM

2.2 Experimenteller Aufbau für die Schallemissionsmessung

Im Rahmen eines vorangegangenen Forschungsprojektes wurden breitbandige SE-Sensoren (Fa. GMuG, Typ MA-BIs 30-200) mit einer Messfrequenz von ca. 200 kHz zur Detektion von Mikrorissen im Beton entwickelt. Insgesamt 16 dieser SE-Sensoren wurden an der Betonschwelle befestigt. Darüber hinaus wurden zusätzlich vier Ultraschallsender angeschlossen, um Durchschallungsmessungen während des Versuchs durchzuführen. Abbildung 3 zeigt die perspektivischen Ansichten auf die Vorder- und Oberseite (a) sowie die Rück- und Oberseite (b) von der Betonschwelle mit Lage der SE-Sensoren (rote Punkte) und Ultraschallsendern (gelbe Punkte).

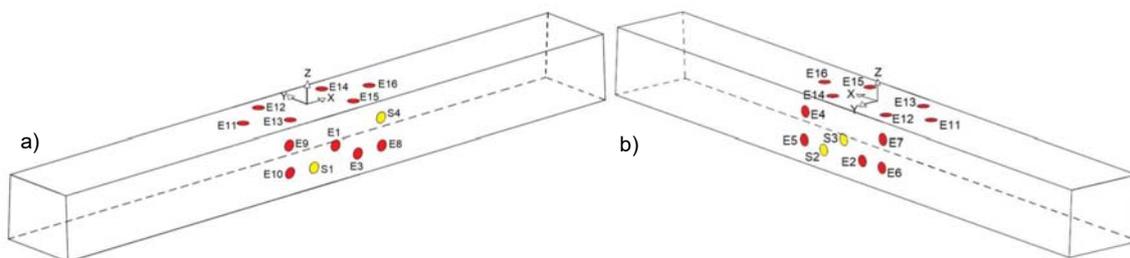


Abb. 3. Perspektivische Ansicht der Schwelle mit der Position der SE-Sensoren (rote Punkte) und Ultraschallsender (gelbe Punkte).

Die SE-Sensoren befinden sich im Bereich der Lasteinleitung, da hier die größten Verformungen und Risse zu erwarten sind. Die Sensoren wurden mit Blechen und Schrauben am Prüfling fixiert. Als Koppelmittel zwischen Sensoren und Betonoberfläche dient ein hochzähes Vakuumfett, um die akustische Leitfähigkeit zu verbessern.

Der Ursprung des Koordinatensystems liegt in der Mitte der Betonschwelle auf der Oberseite, direkt in der Belastungsebene. Vor Beginn des Belastungsversuchs wurden Durchschallungsmessungen und Testmessungen mit einem Bleistiftminenbruch durchgeführt. Die Durchschallungsmessungen wurden vor Beginn der Prüfung durchgeführt, um die Wellengeschwindigkeit für die SE-Ortung zu bestimmen. Während den Durchschallungsmessungen wurden acht Signale unterschiedlicher Form durch den Probekörper an die Empfänger übertragen. Diese Messungen wurden entlang eines linearen Profils (Länge 50 cm, an der Probenoberseite) in 1 cm Schritten durchgeführt [3].

Um die Ortungsgenauigkeit zu bestimmen, wurden künstliche SE-Quellen durch den Bruch einer Bleistiftmine (Hsu-Nielsen-Source, \varnothing 0,5 mm, HB) an sieben verschiedenen Stellen an der Oberfläche der Betonschwelle erzeugt [4]. Mit dieser Methode kann die

Quellortung auf ihre Genauigkeit getestet werden, da sowohl die Positionen des SE-Ereignisses als auch der Empfänger bekannt sind.

Für die Messung konnte ein 16-Kanalgerät zur kombinierten Anwendung von Schallemission und Durchschallung (Hersteller: Fa. GMuG) herangezogen werden. Für die passiven SE-Messungen wurden 16 Kanäle und für die aktiven Ultraschallmessungen 8 Kanäle verwendet. Das Messsystem digitalisiert die Signale in einer sehr hohen Frequenz mit einer Abtastfrequenz von 10 MHz und einer Amplitudenauflösung von 16 Bit. Die Signale werden um 40 dB (Faktor 100) vorverstärkt und anschließend bandpassgefiltert. Die untere und obere Grenzfrequenz des Bandpasses war auf 20 bzw. 200 kHz eingestellt.

2.3 Versuchsprogramm

Die kraftgeregelte Belastung der Schwelle wurde in zwei Phasen durchgeführt. In der ersten Phase wurde eine schrittweise, statische Belastung bis zu einer Last von 120 kN aufgebracht. Nach Entlastung der Schwelle wurde die dynamische Lastaufbringung gestartet. Abb. 4 zeigt das Belastungsregime durch die dynamische Last, dabei ist die obere und untere Druckkraft (schwarze Linien) und der obere und untere Prüfmaschinenweg (rote Linien) gegenüber der Anzahl der Lastzyklen aufgetragen.

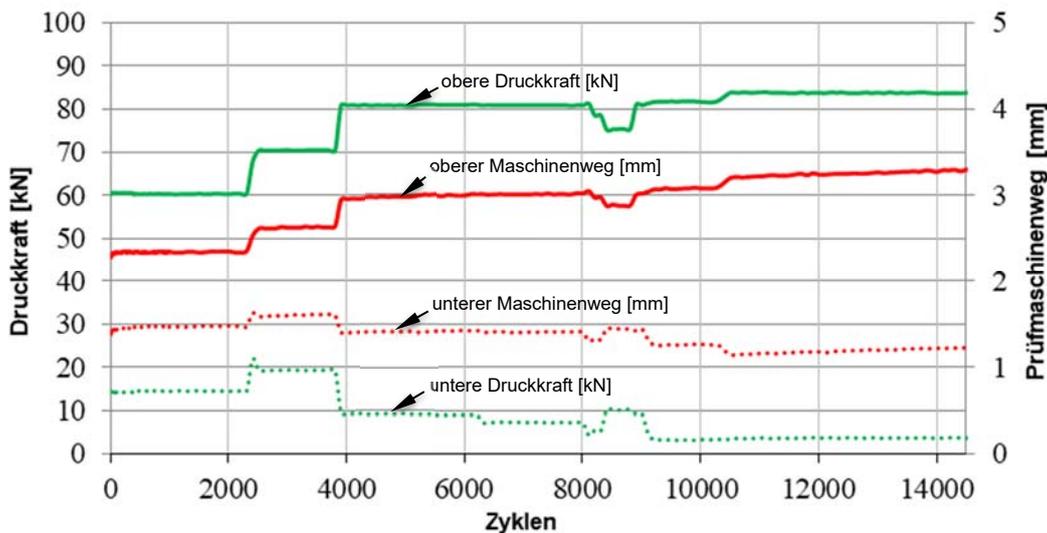


Abb. 4. Belastungsregime und Prüfmaschinenweg

Der dynamische Versuchsablauf wurde mit einer Unter- bzw. Oberlast von 15 bzw. 60 kN gestartet. Bei etwa 4.000 Zyklen wurden die Last auf 10 bzw. 80 kN geändert. Ab 8.000 Zyklen wurde die Schwelle mit einer Unterlast von 5 kN und Oberlast von 85 kN belastet. Während des Experiments wurde die Lastfrequenz von zunächst 1 Hz bis 4 Hz variiert. Bei höherer Lastfrequenz war die SE-Aktivität so intensiv, dass sich die Signale aufeinanderfolgender SE-Ereignisse überlappten. Der Versuch wurde bei ca. 14.800 Zyklen gestoppt.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Durchschallungsmessung

Um die Geschwindigkeit der Longitudinal(P)- und Transvers(S)-Wellen zu bestimmen, wurden Durchschallungsmessungen durchgeführt. Abbildung 5 zeigt beispielsweise das von den 51 Sendepositionen am Empfängersensor Nr. 1 empfangene Rampensignal. Zur Verbesserung der Signalgüte wurden 256 Stapelungen durchgeführt.

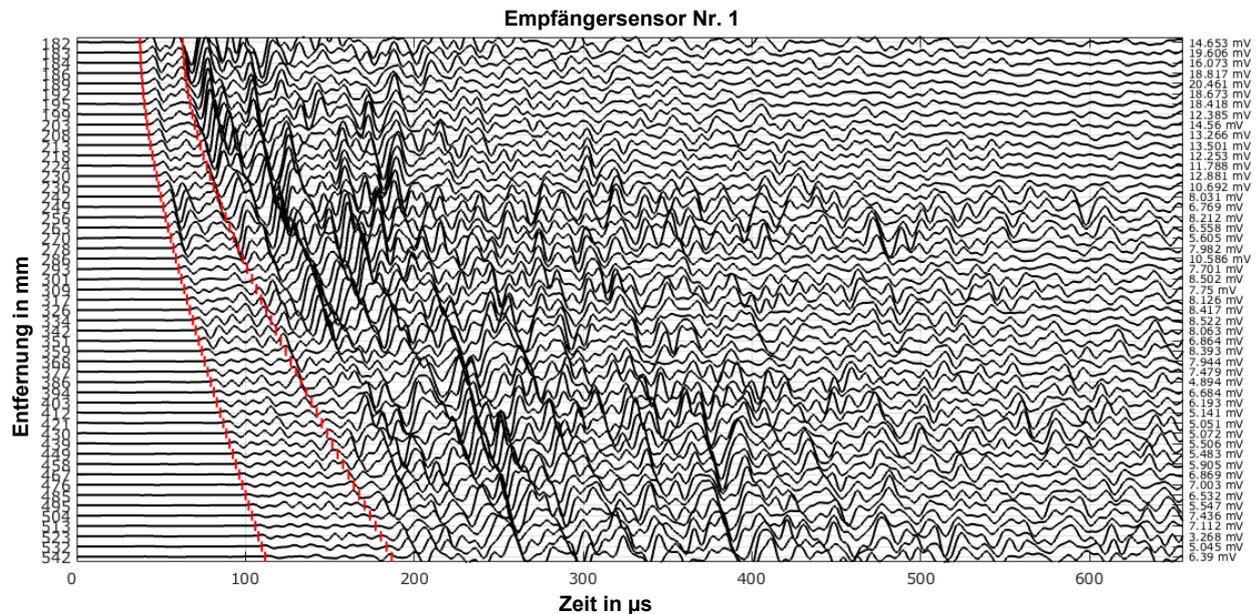


Abb. 5. Empfangene Signale des linearen Profils

Der Abstand zwischen Sender und Empfänger variierte von 182 mm bis 542 mm. In dieser Abbildung werden die Signale auf das Maximum jedes Signals normiert und anschließend um den Faktor 2 vergrößert, um die P- und S-Welleneinsätze besser zu erfassen. Der Normierungsfaktor wird in Millivolt am Ende jeder Messkurve angegeben. Die mittleren Geschwindigkeiten der P- und S-Welle werden aus den aufgenommenen Laufzeiten und den Abständen zwischen Signalquelle und Empfänger berechnet. Die gemessenen Geschwindigkeiten betragen $4,85 \text{ mm}/\mu\text{s}$ für die P-Welle und $2,9 \text{ mm}/\mu\text{s}$ für die S-Welle. Aus diesen Geschwindigkeiten werden die theoretischen Einsätze der P- und S-Welle berechnet und in Abbildung 5 durch rote vertikale Markierungen dargestellt.

3.2 Ergebnisse der SE-Messung

Während des dynamischen Experiments wurden etwa 103.000 Ereignisse aufgezeichnet. Die Ereignisortung wurde nach dem Versuch automatisch durchgeführt. Die verwendeten Parameter zur Bestimmung der Welleneinsatzzeiten und das automatische Ortungsverfahren sind in [5] beschrieben. Aus den Zeitresiduen der P- und S-Welleneinsatzzeiten wurde der theoretische Ortungsfehler mit 5 mm berechnet und als Abbruchkriterium festgelegt. Jedoch zeigen die Bleistiftminenbrüche, dass der wahre Ortungsfehler bei ca. 30 mm liegt, d.h. 6-mal größer als der berechnete Ortungsfehler [5].

Abb. 6 zeigt 12.758 geortete SE-Ereignisse unter Verwendung von mindestens 6 P- und S-Welleneinsätzen, die auf drei Koordinatenebenen (Draufsicht und zwei Seitenansichten) projiziert werden. Die Kontur der Spannbetonschwelle wird durch schwarze Linien und die Positionen der SE-Sensoren durch blaue Punkte in jeder Projektion dargestellt. Die Darstellungen zeigen die wolkenförmige Verteilung der Ereignisse.

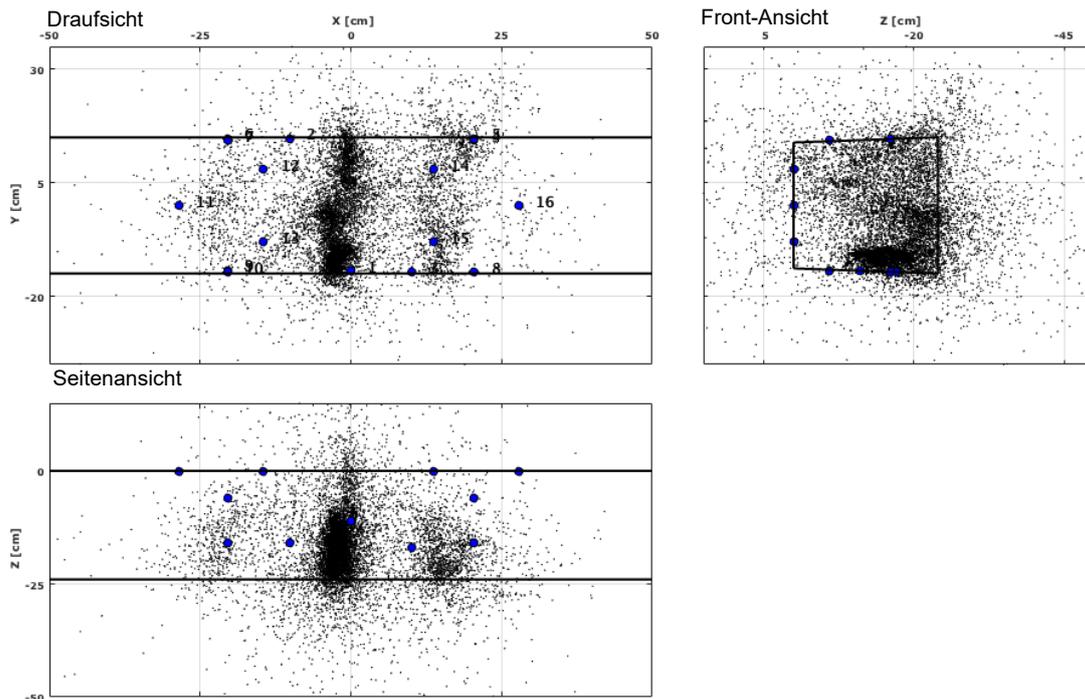


Abb. 6. Projektion der lokalisierten SE-Ereignisse (schwarze Punkte) in der Draufsicht (x-y-Ebene) und zwei Seitenansichten (x-z-Ebene und y-z-Ebene).

Die größte Anhäufung der SE-Ereignisse tritt direkt unter der Lasteinleitung auf. Die Schwelle erfährt in Feldmitte die größte Verformung und durch die Zugbeanspruchungen des Bauteils treten Biegerisse senkrecht zur Bauteilachse auf. Links und rechts der größten Ansammlung deuten schwache SE-Ereignisse auf zwei weitere Anhäufungen hin, die in etwa im gleichen Abstand parallel zur Haupt-SE-Aktivität auftreten.

Um Strukturen innerhalb der Wolkenverteilung zu erkennen, wird das Collapsing-Verfahren nach Jones und Steward [6] angewendet. Dieses Verfahren beschreibt, wie die Ortung eines SE-Ereignisses innerhalb seines Fehlerellipsoids bewegt werden kann. Der Ortungsfehler wird aus der Summe der Laufzeitresiduen, dies beschreibt die Differenz zwischen der gemessenen und berechneten Einsatzzeit, bestimmt.

Der Fehlerellipsoid gibt demnach die räumlichen Grenzen eines Vertrauensbereiches an, in dem das Ereignis mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit liegt. Liegen zwei Ereignisse so nahe zusammen, dass sich ihre Fehlerellipsoide überlappen, so ist die einfachste Interpretation, dass beide Ereignisse aus derselben Quelle stammen, weil ihre Quellorte innerhalb des Ortungsfehlers nicht voneinander zu unterscheiden sind. Deshalb sind auch Verschiebungen der Quellorte innerhalb ihrer Fehlerellipsoide in gewissem Umfang gerechtfertigt. Darum wird beim Collapsing-Verfahren jedes Ereignis auf den Schwerpunkt benachbarter Ereignisse verschoben, soweit diese in dem Ellipsoid liegen [7,8].

Voraussetzung für die Anwendung ist, dass die Ortungsergebnisse keinen systematischen Fehler mehr enthalten. Die systematischen Fehler werden mit dem Joint Hypocenter Determination (JHD) Verfahren [9,10] eliminiert. Dieses Verfahren ermittelt in mehreren Ortungsdurchläufen sogenannte Stationskorrekturen aus den Laufzeitresiduen der P- und S-Welle. Die Ergebnisse des Collapsing sind auf die drei Koordinatenebenen in Abbildung 7 projiziert. Im Vergleich zu Abbildung 6 sind jetzt Strukturen erkennbar, die drei Rissebenen in der Schwelle darstellen. Auch eine Vielzahl der Ereignisse, die außerhalb der Probe aufgezeichnet wurden, befinden sich nun weitgehend innerhalb der Probe.

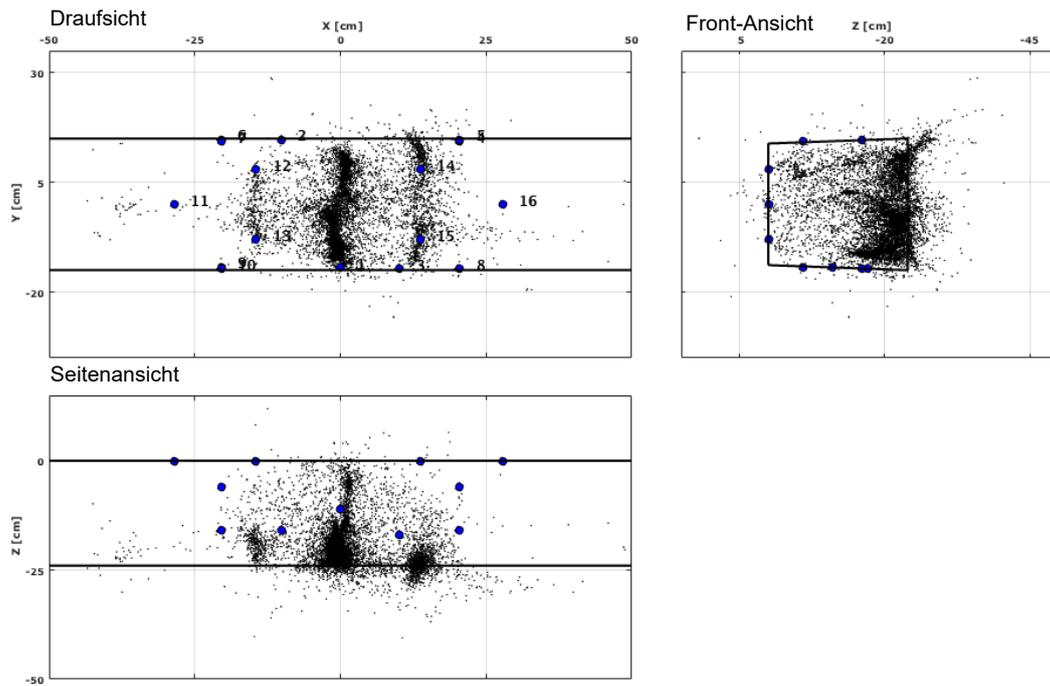


Abb. 7. Lage der SE-Ereignisse nach der Anwendung der Collapsing-Methode aus Abbildung 6

Abbildung 8 zeigt die lokalisierten SE-Ereignisse (Projektion auf die x-z- Ebene) in sechs aufeinanderfolgenden Phasen des Risswachstums bei gleicher Anzahl von jeweils ca. 2125 Ereignissen. Durch den Einsatz der SEA kann der Rissentstehungsprozess durch die Ortung von Mikrorissen beobachtet werden. Die Rissentstehungsphase ist in den Abbildungen 8a und 8b durch die konzentrierte Verteilung der SE-Ereignisse dargestellt. Durch die SE-Aktivität ist ein Wachstum des Hauptrisses von unten nach oben zu beobachten (siehe Abbildung 8c bis 8f). Die Schallemission zeigt, dass mit voranschreitendem Risse nicht nur die Risspitze aktiv ist, sondern immer wieder SE-Ereignisse auf der gesamte Rissfläche auftreten.

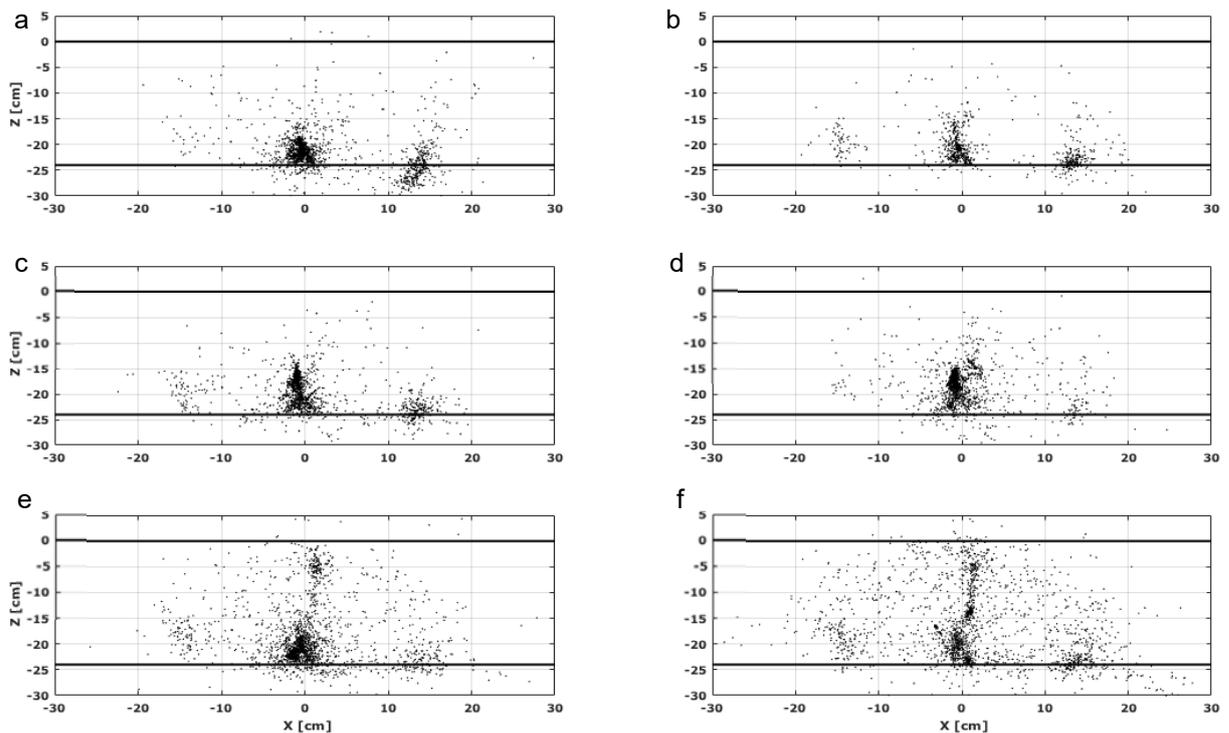


Abb. 8. Zeitlicher Verlauf der SE-Ereignisse, die den gesamten Rissentstehungsprozess in der Betonprobe darstellen

Zur Verifizierung der Ergebnisse aus der SEA wurden Berechnungen des Dreipunkt-Biegeversuchs mit dem Finite-Elemente-Programm ATENA durchgeführt. Durch die integrierten Materialmodelle kann ein realitätsnahes Verhalten des Modells abgebildet werden. ATENA kann die Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit der Konstruktion bestimmen und den erwartenden Versagensmechanismus zuverlässig berechnen [11,12]. Abbildung 9 zeigt die Biegespannung in einem späteren Stadium der Belastung, bevor das endgültige Versagen der Schwelle eintritt. Im Modell wurde von einer Betondruckfestigkeit von etwa 60 MPa ausgegangen. Die Überschreitung der Betonzugfestigkeit führt zu einem makroskopischen Risswachstum in Schwellenmitte, direkt unter der Lasteinleitung. Die Rissbildung entsteht in der Zugzone (auf der Unterseite der Schwelle) und wächst durch die zyklische Belastung in vertikaler Richtung. Die makroskopische Rissbildung wird von vielen kleinen Mikrorissen begleitet, die sich in Bereichen mit höheren Zugspannungen bilden (kurze schwarze Linien in Abbildung 9). Durch die innere Vorspannung werden diese Risse "überdrückt", so dass oberflächlich kaum aufgehende Risse sichtbar sind.

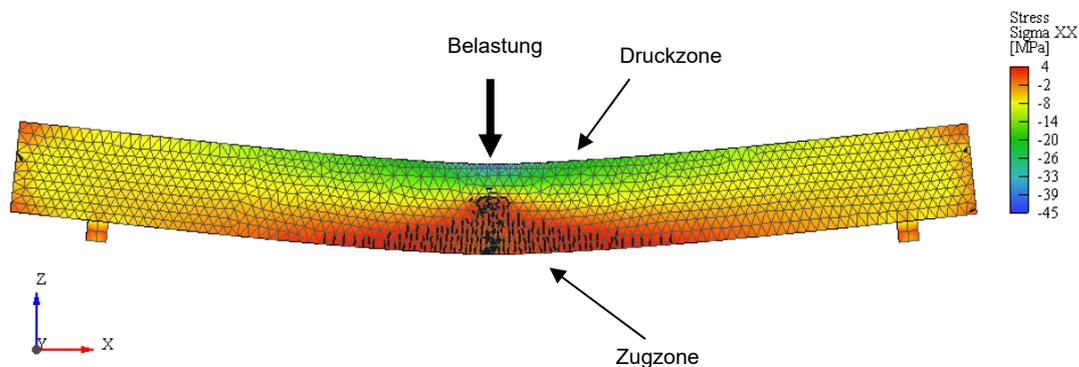


Abb. 9. Darstellung der Ergebnisse der nichtlinearen FE-Berechnung des Dreipunkt-Biegeversuchs einer Spannbetonprobe (überhöhte Darstellung)

4 Zusammenfassung und Ausblick

In den durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden die Rissbildung in Spannbetonschwellen während einer zyklischen Biegebeanspruchung mit Hilfe der Schallemissionsanalyse untersucht. Durch die zyklische Beanspruchung finden im Beton Ermüdungserscheinungen statt, die auf eine irreversible Verformung und auf einen Steifigkeitsverlust zurückzuführen sind. Insbesondere durch die Überschreitung des Verformungsvermögens des Zementsteins entstehen Mikrorisse, die eine Abnahme der Steifigkeit zur Folge haben. Die SEA ermöglicht die Beobachtung des Rissfortschritts in der Betonmatrix der vorgespannten Betonprobe im laufenden Versuch. Die SE-Aktivität beginnt unmittelbar nach Beginn der zyklischen Belastung. Die SE-Ereignisse wurden überwiegend in der Zugzone detektiert, da es hier zur Überschreitung der Betonzugfestigkeit kommt. Eine oberflächliche Rissbildung in diesem Bereich war erst zeitverzögert wahrzunehmen. Dies lässt sich auf die interne Vorspannung durch die Spannstäbe (hohe Zugfestigkeit von 1.500 MPa) zurückführen. Im Verlauf der Versuchsdurchführung zeigte sich eine sehr intensive SE-Aktivität durch das Wachstum der Biegerisse. Bei weiterer Belastung entstehen in der Zugzone weitere kleine Biegerisse, die zu zusätzlichen makroskopischen Rissen parallel zum ersten Hauptriss führen. Die Ergebnisse konnten mit Berechnungsergebnisse aus einer nichtlinearen FE-Berechnung verifiziert werden. Aufgrund der weiteren hochzyklischen Belastung versagte die Spannbetonschwelle letztendlich durch eine Überschreitung der Betondruckspannung.

Durch den Versuch konnten wertvolle Erfahrungen in der Prüfung von vorgespannten Bauteilen mit der SEA gesammelt werden. Unter Berücksichtigung der wahren Ortungsfehler muss das Verfahren und die gewählten Parameter weiterhin an die Betoneigenschaften angepasst werden. Der Versuch ist Basis für kontinuierliche In-Situ-SE-Messungen an Betonstrukturen analog zum Struktur Healths Monitoring in [13].

Danksagung

Diese Arbeit wurde mit Mitteln des Strategischen Forschungsfond der Technischen Hochschule Mittelhessen unterstützt. Die Autoren danken Hirokazu Moriya von der Graduate School of Engineering, Japan, für die Überarbeitung der Ergebnisse mit dem „Collapsing-Verfahren“.

Referenzen

- [1] Hentschel, V.: Fahrwegstrategie der DB Netz AG – Anlagenverfügbarkeit im Lebenszyklus, 3. Symposium Lebenszyklus System Betonschwelle 2017, Betonschwellenindustrie e.V., 2017.
- [2] DIN EN 13230-4, Bahnanwendungen-Oberbau-Gleis und Weichenschwellen aus Beton – Teil 4: Spannbetonschwellen für Weichen und Kreuzungen, Beuth Verlag, Berlin, 2016.
- [3] Hsu, N.N., Breckenridge, F.R.: Characterization and Calibration of Acoustic Emission Sensors, *Materials Evaluation*, Vol. 39, S. 60-68, 1981.
- [4] Manthei, G.: Seismic Tomography on a Pillar in a Potash Mine, In: 4th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, Krakau, Polen, S. 237-243, 1997.
- [5] 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. International Acoustic Emission Conference*, Sapporo, Japan, S. 1-9, 2018.
- [6] Jones, R.H., Stewart. R.C.: A method for determining significant structures in a cloud of earthquakes, *J. Geophys. Res.* 102, S. 8245-8254, 1997.
- [7] Manthei. G., Moriya, H., Jones, R.H., Niitsuma H., Eisenblätter, J.: Anwendung der Collapsing-Methode zur Erkennung von Strukturen in wolkenartig verteilten Ortungsanhäufungen in einer Steinsalzprobe, *Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, Heft 1, S. 2-12, 2003.
- [8] Manthei. G., Moriya, H., Jones, R.H., Niitsuma H., Eisenblätter, J.: Anwendung der Collapsing-Methode auf Schallemissionsereignisse in einer Steinsalzprobe während eines triaxialen Kompressionsversuchs, 14. Kolloquium Schallemission; Berlin, *Berichtsband 82-CD der DGZfP*, S. 27-39; 2003.
- [9] Douglas, A.: Joint hypocenter determination, *Nature*, Vol. 215, S. 47-48, 1967.
- [10] Frohlich. C.: An Efficient Method for Joint Hypocenter Determination for Large Groups of Earthquakes, *Computers and Geosciences*, 5, pp. 387-389, 1979.
- [11] Červenka, V., Jendele, L., Červenka, J.: Dokumentation „ATENA Theory“, Červenka Consulting, 2018.
- [12] Manthei G., Koob, M., Minnert, J.: Anwendung der Schallemissionsanalyse bei zughafter Ermüdungsbeanspruchung eines plattenförmigen Probekörpers aus Stahlbeton, 22. Kolloquium Schallemission, Karlsruhe, Vortrag 17, 2019.
- [13] Manthei, G., Plenkers, K.: Review on In Situ Acoustic Emission Monitoring in the Context of Structural Health Monitoring in Mines, *Applied Sciences* 8, 2018, doi:10.3390/app8091595