TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 48

Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

10. SYMPOSIUM EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN

11. März 2019

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: +49 351 463-3 65 68
Fax: +49 351 463-3 72 89

Titelbild:
Belastungsrahmen für die Prüfung von Geschossdecken im Jugendstil-Kaufhaus Görlitz (Foto: Oliver Mosig, s. Beitrag Mosig et al. in diesem Tagungsband)

Redaktion und Layout: Silke Scheerer
Korrekturen: Petra Kahle, Angela Heller
Umschlag und Druckvorbereitung: Stefan Gröschel
Für die Inhalte der Beiträge sind die Autor*innen verantwortlich.

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz
Veröffentlicht: Dresden, März 2019

Der Tagungsband ist open access auf der Homepage des Instituts für Massivbau verfügbar (https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/das-institut/veranstaltungen/SEUB).

ISSN: 1613-6934
ISBN: 978-3-86780-583-4

Inhalt

Vorwort 7

Steffen Marx, Jürgen Grünberg, Gregor Schacht
Sicherheitskonzept für Belastungsversuche 9

Mai Häßler
Experimentelle Bestimmung des Beanspruchungszustands in fachwerkartigen Eisen- und Stahltragwerken mit Hilfe von Schwingungsmessungen 23

Thilo Fröhlich, Veit Birtel, Dieter Lotze
Zyklische Prüfung von Befestigungen in Beton mittels Schwingungsanregung 33

Oliver Mosig, Sabine Wellner, Jörg Rudolph
Belastungsprüfung der Geschossdecken im Jugendstil-Kaufhaus Görlitz 45

Volker Wetzk, Claudia Pahlow
Das Potenzial von Miniatur-Druckproben für die Werkstoffcharakterisierung von Stahlguss 59

Kerstin Speck, Fritz Vogdt, Manfred Curbach, Yuri Petryna
Faseroptische Sensoren zur kontinuierlichen Dehnungsmessung im Beton 71

Jens Heinrich, Reinhard Maurer
Rissmonitoring zur Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit an bestehenden Brückenbauwerken 83

Max Käding, Gregor Schacht, Guido Bolle, Steffen Marx
Überwachung von Brücken mit Gefährdung durch Spannungsrisskorrosion 97

Florian Schill, Milo Hirsch, Andreas Eichhorn
Überwachung von Tragwerken mit Profilscannern 109

Jörg Scheithauer, Chris Hobusch, Falk Steinigk, Torsten Hillig, Matthias Schramm
UAV und BIM – neue Herausforderungen an die Bauüberwachung bei Infrastrukturmaßnahmen an Eisenbahnbrücken der Deutschen Bahn 123

Nico Steffens, Kay Degenhardt, Karsten Geißler
Modifiziertes Ziellastniveau bei Straßenbrücken durch Bauwerksmonitoring 135

Marc Gutermann, Werner Malgut, Carsten Böhme
Experimenteller Nachweis von Straßenbrücken kleiner Stützweite am Beispiel von Wegebrücken in der Eilenriede, Hannover 147

Oliver Fischer, Sebastian Gehrlein
Weggesteuerte In-situ-Querkraftversuche (bis in den Nachbruchbereich) und innovative Messtechnik an einer 60 Jahre alten 7-feldrigen Spannbetonbrücke ... 161

Zyklische Prüfung von Befestigungen in Beton mittels Schwingungsanregung

Thilo Fröhlich[1], Veit Birtel[2], Dieter Lotze[2]

Kurzfassung. Im Beton- und Stahlbetonbau kommen Befestigungsmittel für die Verbindung von verschiedenen Bauteilen zum Einsatz. Um die Tragsicherheit solcher Befestigungen zu gewährleisten, werden im Rahmen der Produktqualifizierung experimentelle Eignungsprüfungen durchgeführt. Hier stellen zyklische Versuche eine besondere Herausforderung für die Prüftechnik dar, wobei die Aufbringung der Beanspruchung in der Regel mit servohydraulischen Prüfzylindern erfolgt. In diesem Beitrag wird eine alternative Prüfmethode vorgestellt, die auf dem Prinzip der Schwingungsanregung von Systemen mit Hilfe elektrodynamischer Shaker oder Unwuchterreger beruht. Damit lassen sich Belastungssituationen wie wiederholte Belastungen auf den Anker oder zyklische Rissöffnungen im Beton erzeugen, die bei der Anwendung von Befestigungen unter statischer bzw. quasi-statischer Einwirkung, aber auch bei Erdbeben- und Ermüdungsbeanspruchung auftreten können.

Im Gegensatz zu den gegenwärtigen Zulassungsprüfungen erlaubt die dargestellte Methode, vollständige Verbindungsdetails unter realitätsnahen Randbedingungen zu testen. Dadurch ist es u. a. möglich, die Interaktion zwischen Befestigung und der angeschlossenen Konstruktion zu untersuchen.

1 Einleitung

1.1 Befestigungsmittel

Zur Übertragung von Kräften in Betonbauteile stehen heutzutage eine Vielzahl von verschiedenen Befestigungssystemen zur Verfügung. Der Anwendungsbereich von EN 1992-4 [1] unterscheidet hierbei die in Bild 1 schematisch dargestellten Befestigungsmittel. Im Fertigteilbau werden häufig Einlegeteile wie Ankerschienen oder Kopfbolzen verwendet, die vor der Betonage in die Schalung eingebaut werden. Damit ist die genaue Lage der Befestigung bekannt, sodass eine eingelegte Zusatzbewehrung bei der Lastaufnahme berücksichtigt werden kann. Hingegen zeichnen sich nachträglich montierte mechanische

[1] M.Sc., Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
[2] Dr.-Ing., Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

Befestigungsmittel und chemische Dübel durch ihren flexiblen Einsatz aus und stellen insbesondere bei Sanierungs- und Verstärkungsmaßnahmen eine wirtschaftliche und effiziente Methode dar.

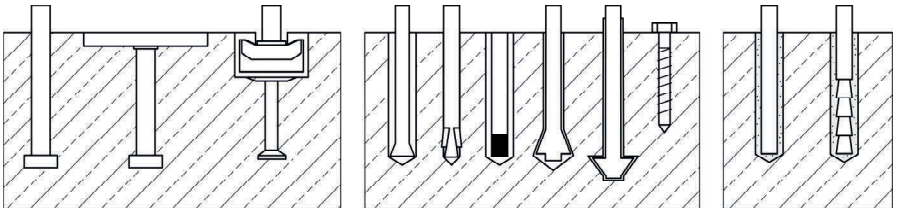

Bild 1 Befestigungsmittel für Beton nach EN 1992-4 [1]; von links nach rechts: Kopfbolzen und Ankerschienen | mechanische Dübel | chemische Dübel

Bei Befestigungen erfolgt die Einleitung von Zuglasten durch Formschluss, Reibung oder Verbund. Deren Tragfähigkeit wird von unterschiedlichen Versagensarten bestimmt, wie z. B. Stahlbruch, Betonversagen sowie Versagen des Verbunds zwischen Befestigungselement und Beton. Ausführliche Beschreibungen zum Tragverhalten der einzelnen Befestigungsarten sind z. B. in [2] zu finden.

1.2 Beanspruchungen von Befestigungen

Beanspruchungen aus Eigengewicht, Wind, Schnee und Verkehrslast werden im Bauwesen in der Regel als vorwiegend ruhende Belastung betrachtet. Neben der statischen bzw. quasi-statischen Belastung treten jedoch auch zyklische Beanspruchungen auf, bei denen nicht nur die Lasthöhe, sondern auch der zeitliche Verlauf der Belastung eine wichtige Rolle spielt. Letztere lassen sich gemäß Bild 2 grundsätzlich in vier Belastungsarten unterteilen. Harmonische und periodische Belastungen stellen oftmals wiederholte Einwirkungen dar, die zur Materialermüdung führen können. Transiente Belastungen sind z. B. Erdbebenbeanspruchungen und stoßartige Belastungen. Diese können bei Explosionen oder dem Anprall von Fahrzeugen entstehen.

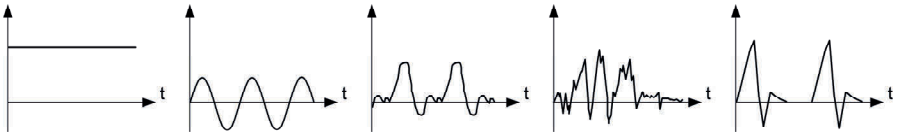

Bild 2 Belastungsarten in Abhängigkeit von der Zeit, in Anlehnung an [3]; von links nach rechts: statisch | harmonisch | periodisch | transient | stoßartig

Bei Befestigungen können Einwirkungen als Kräfte an dem Anbauteil bzw. den Befestigungsmitteln angreifen aber auch den als Verankerungsgrund dienenden Beton beanspruchen. Belastungen aus Zug bzw. Druck, Querlast, Schräglast und Moment werden über die Ankerplatte als Zug- bzw. Querkräfte auf die einzelnen Anker verteilt. Druckkräfte werden in der Regel direkt über die Ankerplatte in den Beton abgetragen.

Der Ankergrund kann ebenfalls durch die oben angeführten Belastungen beansprucht werden. Für die Verankerung von Befestigungen in Beton- und Stahlbetonbauteilen muss daher davon ausgegangen werden, dass der Beton gerissen ist und die Befestigungsmittel aufgrund ihrer 'rissanziehenden' Wirkung in Rissen liegen. Damit wird das Tragverhalten von Befestigungen zusätzlich durch die Größe und den Verlauf der auftretenden Risse sowie die Rissänderungen im Beton beeinflusst.

1.3 Prüfung von Befestigungen unter zyklischer Belastung

Mit EN 1992-4 [1] stehen Regelungen für die Bemessung von Befestigungen im Beton- und Stahlbetonbau zur Verfügung. Demnach dürfen Befestigungsmittel unter statischen bzw. quasi-statischen Belastungssituationen, aber auch bei seismischen und ermüdungsrelevanten Beanspruchungen eingesetzt werden. Die Verwendbarkeit der einzelnen Produkte muss jedoch im Rahmen der Produktqualifizierung festgestellt werden. Um die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln für den vorgesehenen Anwendungsbereich nachzuweisen, werden entsprechende Eignungsversuche gefordert. Ein wichtiger Bestandteil der experimentellen Untersuchungen sind neben statischen Prüfungen auch Versuche unter zyklischen Beanspruchungen. Hierzu zählen sowohl zyklische Zug- bzw. Querlastversuche als auch Prüfungen an Befestigungen in sich öffnenden und schließenden Rissen. Die Aufbringung der Last- oder Risszyklen erfolgt im Regelfall mit Hilfe servohydraulischer Prüfzylinder. Aus Gründen der Vereinfachung werden dynamische Beanspruchungen versuchstechnisch häufig auf eine harmonische (sinusförmige) Belastung zurückgeführt.

Der vorliegende Beitrag stellt eine alternative Prüfmethode für die zyklische Prüfung von Befestigungen vor, die auf dem Prinzip der Schwingungsanregung mittels elektrodynamischer Kraft- oder Unwuchterreger beruht. Die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten dieser Methode werden anhand der nachfolgenden Beispiele aufgezeigt, vgl. Bild 3:

- Beispiel 1: statische Versuche mit Rissänderung,
- Beispiel 2: Erdbebenversuche mit zyklischer Last und Rissänderung,
- Beispiel 3: Ermüdungsversuche mit zyklischer Last.

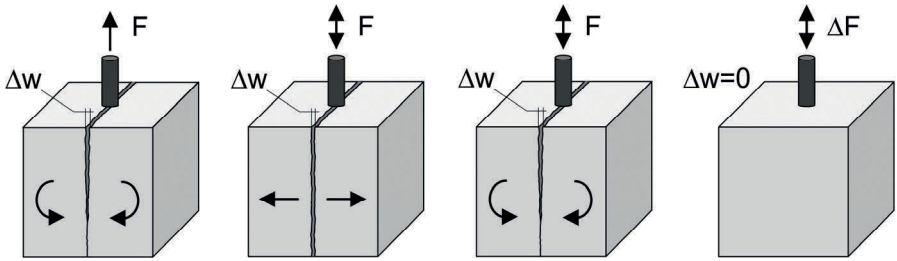

Bild 3 Versuche an Befestigungen unter zyklischen Belastungsbedingungen; von links nach rechts: Bsp. 1: statisch | Bsp. 2.1 und 2.2: Erdbeben | Bsp. 3: Ermüdung

2 Statische Versuche mit Rissänderung

Um die Eignung von Dübelbefestigungen im gerissenen Beton unter statischen bzw. quasi-statischen Anwendungsbedingungen nachzuweisen, stellen die Versuche mit zyklischer Rissöffnung bei konstanter Zuglast eine häufig maßgebende Prüfung dar. Derzeitige Richtlinien [3] sehen 1000 Rissänderungen zwischen Δw_1 = 0,3 mm und Δw_2 = 0,1 mm vor, wobei die untere Rissbreite während der Prüfung bis auf Δw_2 = 0,2 mm ansteigen darf.

Im Labor werden die Eignungsversuche an bewehrten Betondehnkörpern mit Linienrissen konstanter Breite durchgeführt, wobei die Steuerung der Risszyklen über eine auf den Prüfkörper wirkende Zugkraft mittels Hydraulikzylindern mit einer Frequenz von etwa 0,2 Hz erfolgt [5].

In der Praxis werden Stahlbetonbauteile häufig auf Biegung beansprucht. Darin bilden sich keilförmige Risse aus, deren Rissbreite zur Nulllinie hin abnimmt. An der MPA Stuttgart wurden daher Tastversuche durchgeführt, die das Tragverhalten von Dübeln in sich öffnenden und schließenden Biegerissen untersuchen sollten. Die Untersuchungen erfolgten an Betonschrauben und Verbunddübeln. Nachfolgend wird die Durchführung dieser Versuche näher beschrieben, die Prüfergebnisse sind in [6] dargelegt.

Für die Versuche wurde der in Bild 4 schematisch dargestellte Versuchsaufbau realisiert. Als Ankergrund diente eine 25 cm dicke Stahlbetonplatte der Festigkeitsklasse C30/37, die als gelenkig gelagerter Einfeldträger mit einer Stützweite von 5,00 m konzipiert war. Die zu

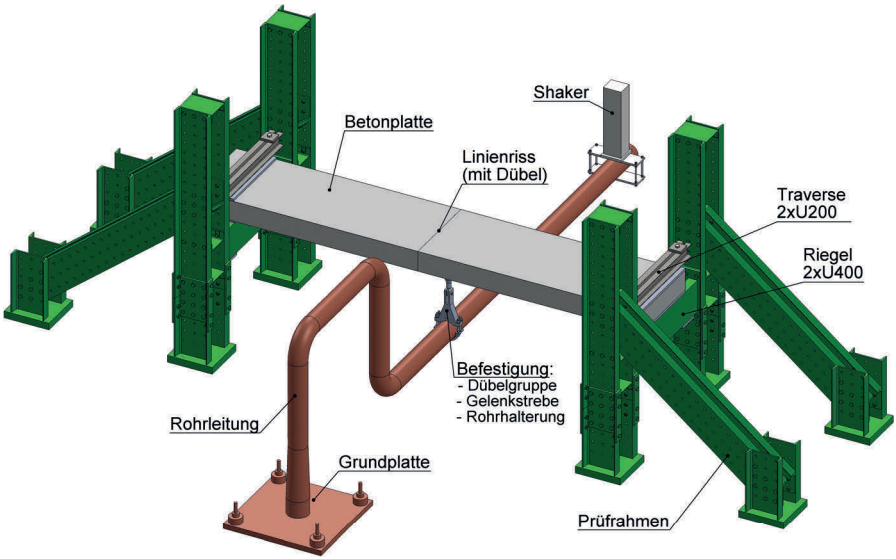

Bild 4 Prüfstand für statische Versuche mit Rissänderung (Dübel und Pneumatikzylinder auf der Plattenunterseite nicht sichtbar)

prüfenden Dübel wurden in einen bestehenden Linienriss in der Betonzugzone der Biegeplatte gesetzt. Zum Öffnen und Schließen der Risse wurde der Prüfkörper in Feldmitte über eine angehängte Rohrleitung mit Hilfe eines elektrodynamischen Shakersystems zu sinusförmigen Schwingungen mit einer Frequenz von 3,25 Hz vertikal angeregt. Die Einstellung der angestrebten Rissbreiten erfolgte über die Skalierung der Kraftamplituden des Shakers. Die Belastungseinrichtung der Dübel bestand aus Pneumatikzylindern, um den Einfluss von Massenträgheitskräften während der Plattenschwingungen zu minimieren. Die gewünschte Zuglast wurde durch die Änderung des Luftdrucks mit einem Regelventil eingestellt.

Bild 5 zeigt exemplarisch den Belastungsverlauf der Betonplatte und die gemessene Rissbreite an der Plattenunterseite während eines Versuchs mit konstanter Shakeramplitude. Weiterhin lassen sich über die elektronische Steuereinheit des Shakers beliebige Anregeverläufe generieren, mit denen die Rissbreite während der Versuchsdurchführung gezielt verändert werden kann.

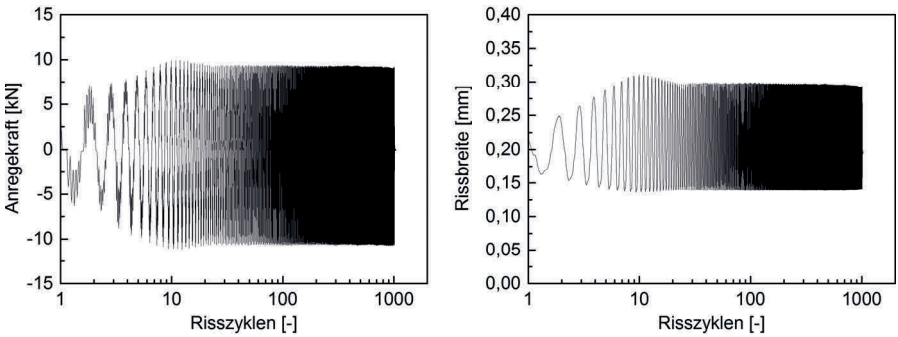

Bild 5 Anregekraft der Betonplatte (links) und Rissbreite an der Plattenunterseite (rechts) während eines Versuchs mit 1000 Risszyklen

3 Erdbebenversuche mit zyklischer Last und Rissänderung

3.1 GRS-Forschungsprojekt

Im Rahmen eines Forschungsprojekts zur Reaktorsicherheit [7] wurden experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt, um auftretende Interaktionen zwischen Bauwerk, Befestigung und Rohrleitung bei Erdbebenbeanspruchung zu studieren. In der Phase I des Projekts wurden auf Basis von Kleinversuchen ein nichtlineares Federmodell für Einzeldübel abgeleitet sowie großmaßstäbliche Versuche unter definierten Randbedingungen bei verschiedenen Lastniveaus und Rissbreiten durchgeführt. In Phase II erfolgten Verifikationsversuche zur Überprüfung der entwickelten Rechenmodelle und die Analyse der strukturdynamischen Wechselwirkungen am Gesamtsystem unter realitätsnahen Erdbebenbedingungen.

3.2 Großmaßstäbliche Versuche

Für die Durchführung der großmaßstäblichen Versuche in Phase I wurde ein spezieller Versuchsstand entwickelt, der die Prüfung von Befestigungen in einem gekoppelten System mit angeschlossener Komponente bei gleichzeitig wirkenden Last- und Risszyklen erlaubt. Die in Bild 6 dargestellte Rohrleitung wurde mit einer beidseitig gelenkig ausgeführten Halterungskonstruktion über eine Ankerplatte mit zwei Dübeln an einer Betonplatte befestigt, so dass die Befestigung vorwiegend auf Normalkraft (Zug bzw. Druck) beansprucht wurde. Als Befestigungsmittel kamen zwei verschiedene Hinterschnittdübel der Größe M12 zum Einsatz, deren Eignung für die Anwendung in kerntechnischen Anlagen im Rahmen eines Zulassungsverfahrens gemäß DIBt-Leitfaden 2010 [8] nachgewiesen war.

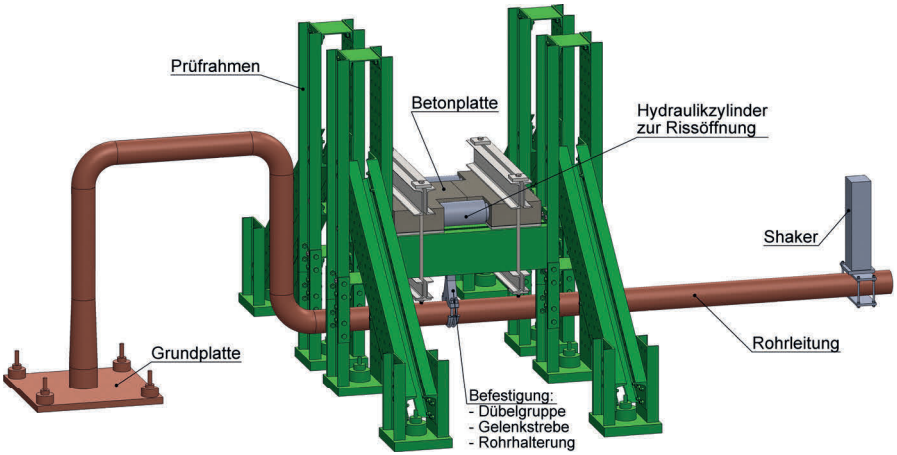

Bild 6 Prüfstand für großmaßstäbliche Erdbebenversuche

Die erdbebenähnliche Beanspruchung der Befestigungskonstruktion erfolgte über die Schwingungsanregung der Rohrleitung mit Hilfe eines elektrodynamischen Shakers. Auf der Grundlage von numerischen Berechnungen an einem Finite-Elemente-Modell eines Reaktorgebäudes für einen typischen deutschen Standort wurden maßgebende Beschleunigungszeitverläufe generiert, um ein repräsentatives Erdbebensignal für die Shakeranregung zu erhalten (Bild 7). Das gewünschte Beanspruchungsniveau für die Dübelbefestigung wurde durch Skalierung der Shakeramplituden eingestellt.

Die Betonstruktur bestand aus einer 21 cm dicken Stahlbetonplatte der Festigkeitsklasse C30/37. In der Platte wurde ein Linienriss erzeugt, so dass sich ein Dübel im Riss und der andere Dübel im ungerissenen Beton befand. Das zyklische Öffnen und Schließen des Risses wurde mit Hilfe von zwei Hydraulikzylindern realisiert, die in den beidseitig dafür vorgesehenen Aussparungen der Betonplatte positioniert waren. Aufgrund der geringen Risszyklusfrequenz von 0,2 Hz wurde die Versuchsdauer während einer Erdbebenlaststufe

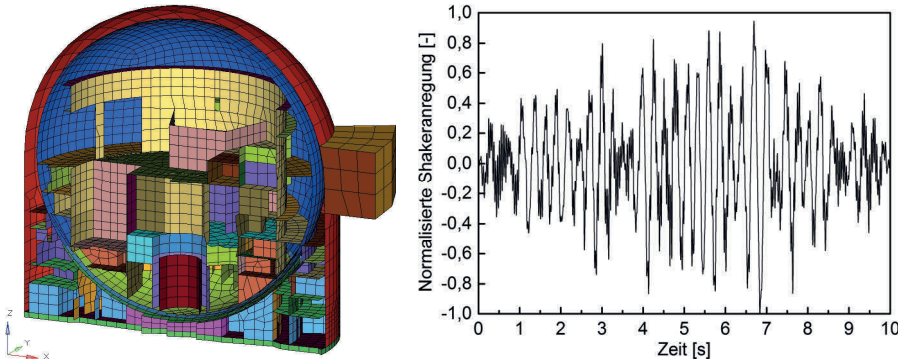

Bild 7 FE-Modell Reaktorgebäude (links) und Zeitverlauf Shakersignal (rechts)

mit 100 s definiert, um eine erdbebenäquivalente Anzahl von 20 Rissöffnungen zu erzielen. Demzufolge wurde das generierte Zeitsignal für die Shakeranregung zehnmal wiederholt.

Es wurden insgesamt zehn Bauteilversuche bei unterschiedlichen Rissbreiten nach einem festgelegten Ablaufschema mit verschiedenen Laststufen der Erdbebenbelastung durchgeführt. Zur Festlegung des Lastniveaus wurde der Tragwiderstand der Befestigung entsprechend der KKW-Zulassung des jeweiligen Dübeltyps bestimmt. Abschließend wurde das System bei sinusförmiger Resonanzanregung mit konstanter Erregerfrequenz und linear ansteigenden Amplituden belastet, um die Resttragfähigkeit der Befestigung zu ermitteln. Bild 8 zeigt exemplarisch den Verlauf der gemessenen Normalkräfte auf die Befestigung während der Laststufe 1,0-faches Bemessungserdbeben (BEB), die dem Bemessungswiderstand der Dübelgruppe entspricht. Die in diesem Versuch eingestellte Rissbewegung zwischen 1,5 mm und 1,0 mm stellt dabei die ungünstigste Randbedingung dar, die bei den Eignungsversuchen der Dübel gemäß [8] zu berücksichtigen ist.

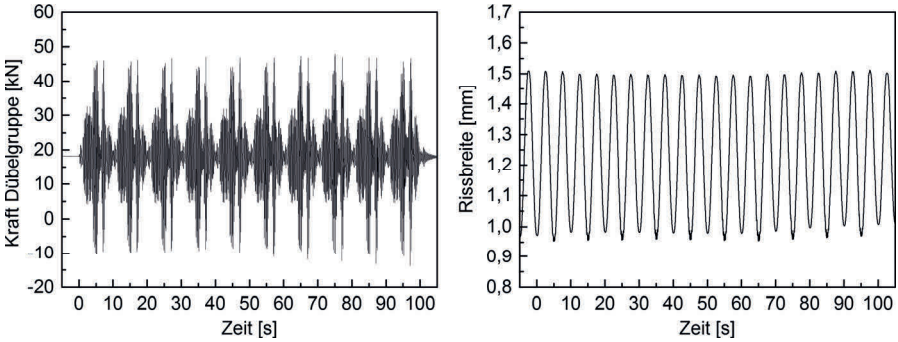

Bild 8 Kraftverlauf auf Dübelgruppe (links) und Rissbreitenänderung 1,0–1,5 mm (rechts) während eines Erdbebenversuchs in Phase I des Forschungsprojekts

3.3 Verifikationsversuche

Im Gegensatz zu den vorstehend beschriebenen Versuchen sollte bei den Verifikationsversuchen in Phase II des Forschungsprojekts nicht nur die zyklische Belastung auf die Befestigung, sondern auch das Rissöffnen und -schließen im Beton mit einer erdbebentypischen Frequenz erfolgen. Das hierzu entwickelte Prüfkonzept sah vor, das in Bild 9 abgebildete System sowohl auf der Betonplatte als auch am Rohrleitungsende mit zwei unterschiedlichen Erregerfrequenzen gleichzeitig anzuregen.

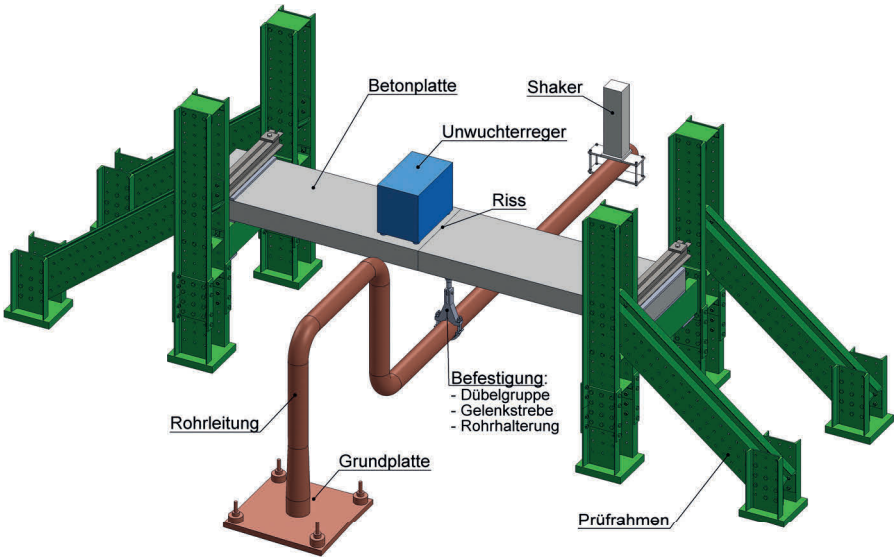

Bild 9 Prüfstand für die Verifikationsversuche in Phase II

Um ein realistisches Rissöffnen und -schließen zu erreichen, wurde die Betonplatte mit einem Unwuchterreger bei einer Resonanzfrequenz von 9 Hz in sinusförmige Schwingungen versetzt. Die Anregung der Rohrleitung erfolgte mit dem in Phase I verwendeten Shakersystem. Die Erdbebendauer wurde gegenüber den großmaßstäblichen Versuchen verkürzt. Als Belastungssequenz wurde das vorhandene Erdbebenzeitsignal entsprechend Bild 7 gewählt. Die Erdbebendauer von 10 s lag somit im Bereich der tatsächlichen Zeitdauer eines Erdbebens in Deutschland. Dabei wurde ein Lastniveau angestrebt, das maximale Zugkräfte auf die Befestigung in Höhe des Bemessungswiderstands der Dübelgruppe erzeugt.

Bei der Auslegung der Versuche wurde anhand von linearen Zeitverlaufsberechnungen des gekoppelten Systems mit unterschiedlichen Parametern eine 25 cm dicke Stahlbetonplatte mit einer Stützweite von 5 m ausgewählt. Die Längsbewehrung der Betonplatte wurde so ausgelegt, dass der in Feldmitte erzeugte Linienriss während der Versuchsdurchführung eine maximale Rissbreite von w_{max} = 1,5 mm an der Betonoberfläche aufweist (Bild 10).

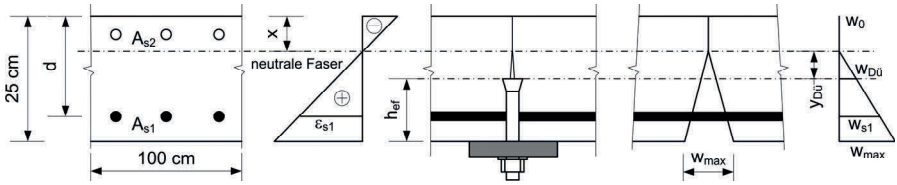

Bild 10 Auslegung der Betonplatte für die Verifikationsversuche

Für die Anbindung der Rohrleitung an die Betonplatte wurden die gleichen Komponenten verwendet wie bei den Versuchen in Phase I. Da im Rahmen der Verifikationsversuche unterschiedliche Risskonfigurationen mit vertretbarem Prüfaufwand untersucht werden sollten, fokussierten sich die Untersuchungen nur auf einen Dübeltyp. Das Prüfprogramm umfasste zwei Versuche, bei denen ein Dübel im Riss positioniert war, und zwei Versuche mit beiden Dübeln im Riss.

Um die angestrebte Belastungsintensität im Versuch zu erreichen, mussten die beiden Schwingerreger zu definierten Zeitpunkten angesteuert werden. Der Unwuchterreger benötigte einen Vorlauf von etwa 30 s zur Einstellung einer konstanten Zielfrequenz und Erzeugung der gewünschten Erregerkraft. Danach wurde das 10 s dauernde Erdbebensignal durch das Shakersystem auf der Rohrleitung dazugeschaltet.

Die Kraft- und Rissbreitenzeitverläufe während der Versuche waren durch eine Überlagerung der Eigenform der Betonplatte bei 9 Hz und der Rohrleitung bei 3 Hz gekennzeichnet. Die gemessenen Rissbreiten an der Betonoberfläche variierten hierbei zwischen Δw_{max} = 1,5–0,4 mm. Aufgrund der Biegebeanspruchung der Betonplatte war die Rissöffnung im Hinterschnitt der Dübel bei h_{ef} = 125 mm mit $\Delta w_{Dü}$ = 0,6–0,1 mm deutlich kleiner (Bild 11).

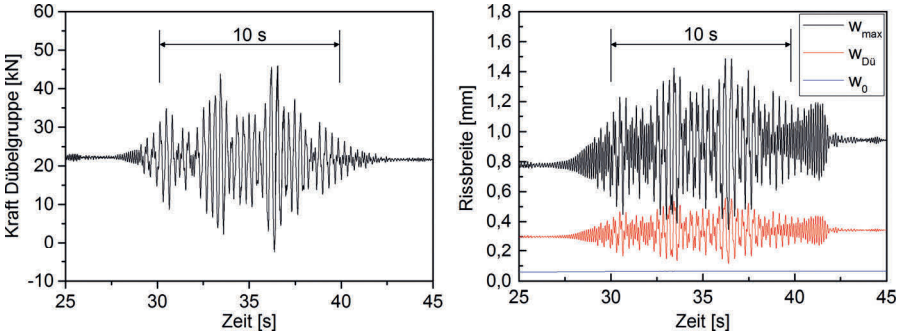

Bild 11 Kraftverlauf (links) und Rissbreiten (rechts) während der Verifikationsversuche

4 Ermüdungsversuche mit zyklischer Last

Der Einsatz von Befestigungen unter ermüdungsrelevanten Beanspruchungen gewinnt immer mehr an Bedeutung. Als typische Anwendungsfälle sind hier Befestigungen von Kranbahnen, Aufzugsführungsschienen und Maschinen zu nennen, wobei zunehmend erhöhte Anforderungen an die Lebensdauer von Fassadenverankerungen und im Bereich des Brücken- und Tunnelbaus gestellt werden.

Für den Einsatz bei Ermüdungsbeanspruchungen ist die Eignung des Befestigungsmittels im Zuge des Zulassungsverfahrens gesondert nachzuweisen. Die Bestimmung der Ermüdungstragfähigkeit erfolgt auf Basis von Einstufen-Dauerschwingversuchen. Die derzeitigen Prüfverfahren sehen einen Mindestumfang von etwa 20 Prüfungen vor, um eine zuverlässige statistische Abschätzung für den Verlauf der Wöhlerlinie vornehmen zu können. Dabei sind insbesondere Versuche im Bereich von mehr als $N = 10^6$ Lastwechseln aufgrund geringer Prüfgeschwindigkeiten der servohydraulischen Prüfanlagen mit relativ langen Laufzeiten verbunden und erfordern daher einen hohen Prüf- und Kostenaufwand.

Um Ermüdungsversuche auch bei hohen Lastwechselzahlen wirtschaftlich durchführen zu können, stellt die Erzeugung zyklischer Beanspruchungen durch Resonanzanregung eine Alternative dar. Diese Methode kommt vorrangig bei kleinen Proben mit Resonanzprüfmaschinen zum Einsatz. Aber auch in großmaßstäblichen Ermüdungsversuchen, sowohl an geschweißten Stahlträgern [9] als auch an Stahlbetonbauteilen [10], [11], wurden Resonanzprüfverfahren bereits erfolgreich angewandt.

An der MPA Stuttgart wird derzeit ein Resonanzversuchsstand entwickelt, mit dem hochfrequente Schwingversuche an Befestigungen durchgeführt werden können (Bilder 12 und 13, links). Mit Hilfe von zwei gegenläufig rotierenden Unwuchterregern wird ein Prüfkörper in Abhängigkeit seiner Eigenfrequenz bei etwa 30–40 Hz angeregt. Die erzeugten Biegebeanspruchungen im Träger werden über die Ankerplatte der Befestigung auf die einzelnen Befestigungsmittel übertragen (Bild 13, rechts). Die resultierenden Zugkräfte in den Befestigungselementen können mit Hilfe spezieller DMS-Messtechnik bestimmt werden. Die Durchführung erster Resonanzversuche ist in Vorbereitung.

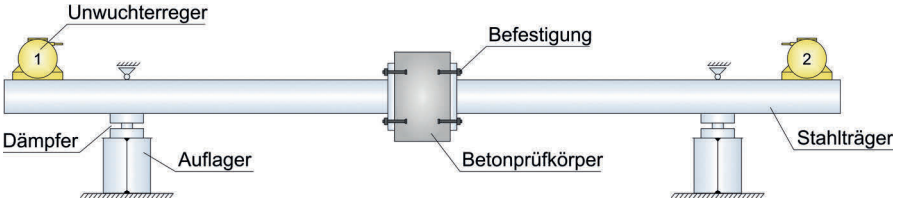

Bild 12 Prinzipskizze Versuchsstand zur Resonanzprüfung von Befestigungen

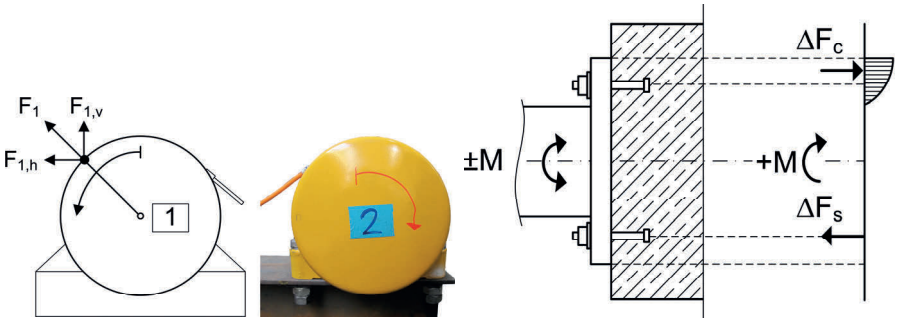

Bild 13 Versuchsstand zur Resonanzprüfung von Befestigungen; links: Detail Unwuchterreger, rechts: Detail Befestigung

5 Schlussfolgerungen

Zyklische Prüfungen bilden einen wichtigen Bestandteil bei der Durchführung von Eignungsversuchen im Rahmen der Produktqualifizierung von Befestigungen im Beton. Bei den derzeitigen Prüfverfahren erfolgt die Erzeugung von zyklischen Belastungen und Rissen auf herkömmliche Weise mit Hydraulikzylindern.

Im vorliegenden Beitrag wurde eine alternative Versuchstechnik für die zyklische Prüfung von Befestigungen vorgestellt, die auf dem Prinzip der Schwingungsanregung mittels elektrodynamischer Kraft- oder Unwuchterreger beruht. Anhand verschiedener Projekte der MPA Stuttgart wurde gezeigt, dass sich die Prüfmethode zur Durchführung von Zuverlässigkeitsversuchen mit sich öffnendem und schließendem Riss eignet, aber auch die Untersuchung des Tragverhaltens von Befestigungen unter realitätsnahen Erdbebenbedingungen bei gleichzeitig wirkenden Riss- und Lastzyklen erlaubt.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Schwingversuche an Befestigungen mittels Resonanzanregung durchzuführen. Gegenüber der bisherigen Vorgehensweise erlaubt diese Methode infolge der höheren Prüffrequenzen eine deutliche Verkürzung der Versuchszeit. Somit kann das Ermüdungsverhalten von Befestigungen auch bei sehr hohen Lastwechselzahlen mit vertretbarem Prüfaufwand untersucht werden.

Danksagung

Das vorgestellte Vorhaben "Wechselwirkungen des gekoppelten Systems Bauwerk – Befestigung (Dübel-Konstruktion) – Rohrleitung bei Erdbebenbeanspruchung" wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter den Förderkennzeichen 1501450 und 1501478 gefördert.

Literatur

[1] prEN 1992-4:2016-03: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 4: Bemessung der Verankerung von Befestigungen in Beton.

[2] Eligehausen, R.; Mallée, R.; Silva, J. F.: Anchorage in concrete construction. Berlin: Ernst & Sohn, 2006

[3] Amman, W. J.: Static and dynamic long-term behavior of anchors. In: Senkiw, G. A.; Lancelot III, H. B. (Hrsg.): Anchors in Concrete-Design and Behavior, Special Publication SP-130, American Concrete Institute, Detroit, 1991, paper SP 130-8, S. 205–220

[4] EOTA TR 048, Technical Report: Details of tests for post-installed fasteners in concrete. Ausgabe August 2016

[5] Eligehausen, R.; Mattis, L.; Wollmershauser, R.; Hoehler, M. S.: Testing Anchors in Cracked Concrete. Concrete International 26 (2004) 7, S. 66–71

[6] Lotze, D.; Fröhlich, T.: Prüfungsbericht Nr. 7852100001/1601, Tastversuche zum Tragverhalten von Dübeln in sich öffnenden und schließenden Biegerissen. Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, 2016

[7] Kerkhof, K.; Bauer, T.; Birtel, V.; Dwenger, F.; Fröhlich, T.; Henkel, F.-O.; Hofmann, J.; Lotze, D.; Mahadik, V.; Ries, M.; Sharma, A.: Wechselwirkungen des gekoppelten Systems “Bauwerk – Befestigung (Dübel-Konstruktion) – Rohrleitung” bei Erdbebenbeanspruchung. Abschlussbericht Phase I, Projekt Nr. 1501450, und Phase II, Projekt Nr. 1501478, Reaktorsicherheitsforschung, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, 2017

[8] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Leitfaden für Dübelbefestigungen in Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Anlagen. Berlin, 2010

[9] Breunig, S.; Kuhlmann, U.: Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren im Stahl- und Verbundbrückenbau. In: Isecke, B.; Krieger, J. (Hrsg.): Tagungsband zum 3. Brückenkoll. – Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken, 19./20.6.2018 in Ostfildern; Ostfildern: Technische Akademie Esslingen e.V., 2018, S. 193–202

[10] Diederley, J.; Herrmann, R.; Marx, S.: Ermüdungsversuche an großformatigen Betonprobekörpern mit dem Resonanzprüfverfahren. Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018) 8, S. 589–597

[11] Berger, J.; Huber, P.; Feix, J.; Kollegger, J.: Hochfrequente Ermüdungsuntersuchungen zur Schubkraftübertragung in unbewehrten Fugen. Bauingenieur 92 (2017) 6, S. 245–255

Bildnachweise

Bild 1	Thilo Fröhlich (neu gezeichnet gemäß [1])
Bild 2	Thilo Fröhlich (neu gezeichnet in Anlehnung an [3])
Bilder 3–6, 7 (rechts), 8–13	Thilo Fröhlich
Bild 7 (links)	Herr Maurer (Fa. Wölfel)

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 48

Das 10. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ fand am 11. März 2019 an der TU Dresden statt. Im vorliegenden Buch sind die schriftlichen Beiträge zusammengestellt.

Das Symposium wurde mit einem Vortrag über Analogiebetrachtungen und Sicherheitsaspekte bei experimentellen Bauwerksuntersuchungen eröffnet. Zum Thema Messtechnik wurden in diesem Jahr vor allem faseroptische Systeme und deren Anwendung sowie die Möglichkeiten digitaler bildgebender Verfahren diskutiert. Zwei Vortragende stellten Messmethoden vor, die auf Schwingungsanregungen beruhen, einmal zur Bestimmung von Stabkräften und einmal für die Prüfung von Befestigungen. Als Fortsetzung eines Beitrags zum 9. SEUB wurde das Potential von Miniaturproben zur Kennwertermittlung dargelegt.

Berichte über Projekte zur Thematik Bauwerksbeprobung und Monitoring rundeten das Vortragsprogramm ab. Neben einem Beispiel aus dem Hochbau nahmen beim 10. SEUB vor allem Projekte aus dem Brückenbau eine dominierende Rolle ein. Die Spanne reichte von der Anwendung faseroptischer Messmethoden bei 1:1-Versuchen über die realitätsnahe Bestimmung von Ziellastniveaus bis zu In-situ-Tests an Brückenbauwerken.

ISBN : 978-3-86780-583-4