

INSTANDSETZUNG VON GESCHÄDIGTEM KONSTRUKTIONSBETON NACH KONTAKTDETONATION

Maximilian M. Fuchs* and Manfred W. Keuser†

* Ingenieurgesellschaft Haumann & Fuchs mbH
Sonntagshornstraße 4, 83278 Traunstein, Deutschland
e-mail: mfuchs@haumann-fuchs.de, web page: www.haumann-fuchs.de

† Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, Universität der Bundeswehr München, Deutschland
e-mails: manfred.keuser@unibw.de, web page: www.unibw.de/massivbau

Key words: hochdynamische Einwirkung, Kontaktdetonation, Stahlbetonplatten, Instandsetzung, Injektion, Grundlagenversuche.

Abstract. *Außergewöhnliche Einwirkungen - wie zum Beispiel Erdbeben und Stoßbeanspruchungen, die durch Fahrzeuganprall oder durch Druck- und Stoßwellen infolge von Detonationen verursacht werden - führen in der Regel zu lokalen Schädigungen in Stahlbetonbauteilen. Sowohl der Schadensbewertung als auch der Instandsetzung von geschädigten Stahlbetonbauteilen kommt im Hinblick auf eine dauerhafte Nutzung der Infrastruktur große Bedeutung zu. Eine mögliche Instandsetzung des Schadens, der durch eine außergewöhnliche Einwirkung hervorgerufen wurde, ist Gegenstand der Untersuchungen. Aufgrund der in einem derartigen Falle nicht wiederkehrenden Rissursache liegt eine Wiederherstellung des monolithischen Bauteilgefüges durch kraftschlüssiges Verbinden der Rissufer mittels Injektion als mögliche Instandsetzungsmaßnahme nahe. Um Kenntnis über die Auswirkungen einer derartigen Rissinjektion auf das Verhalten von geschädigten Stahlbetonbauteilen zu erlangen, wurden zunächst Grundlagenversuche an ausgewählten Probekörpern, die jeweils einen Ausschnitt aus einem geschädigten Bauteil darstellen, durchgeführt. Darauf aufbauend wurden Versuche zur praktischen Anwendung an Stahlbetonplatten, die durch Kontaktdetonation geschädigt waren, durchgeführt. Der Beitrag schließt mit einer Diskussion zur praktischen Anwendbarkeit für die Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen nach außergewöhnlicher Einwirkung.*

1 EINLEITUNG

Außergewöhnliche Einwirkungen - wie zum Beispiel Erdbeben und Stoßbeanspruchungen, die durch Fahrzeuganprall oder durch Druck- und Stoßwellen infolge von Detonationen verursacht werden - führen in der Regel zu lokalen Schädigungen in Stahlbetonbauteilen. Sowohl der Schadensbewertung als auch der Instandsetzung von geschädigten Stahlbetonbauteilen kommt im Hinblick auf eine dauerhafte Nutzung der Infrastruktur große Bedeutung zu. Für die Beurteilung von derartigen Schädigungen ist ein profundes Wissen über die komplexen Beanspruchungsvorgänge bei hochdynamischer Einwirkung und die Materialreaktion des durch Inhomogenität gekennzeichneten Verbundbaustoffes Stahlbeton erforderlich. Darüber hinaus ist Kenntnis über das Schadensausmaß und den Schadensbereich zur Beurteilung der Auswirkungen auf das Trag- und Verformungsverhalten des geschädigten Bauteils von Bedeutung.

Ein charakteristisches Merkmal von Stahlbetonbauteilen, die eine lokale Schädigung infolge hochdynamischer Einwirkung aufweisen, ist die Ausbildung eines zentralen Schädigungsbereichs, der optisch durch Kraterbildung und / oder Perforation erkennbar ist (Kernbereich / Kraterbereich in Bild 1). Darüber hinaus existiert auch ein nicht visuell erkennbarer Schädigungsbereich im umgebenden Material, der durch übermäßige Rissbildung, Gefügeschädigung des Betons sowie ein geschädigtes Verbundverhalten zwischen Beton und Bewehrungsstahl gekennzeichnet ist (Umgebender Bereich in Bild 1).

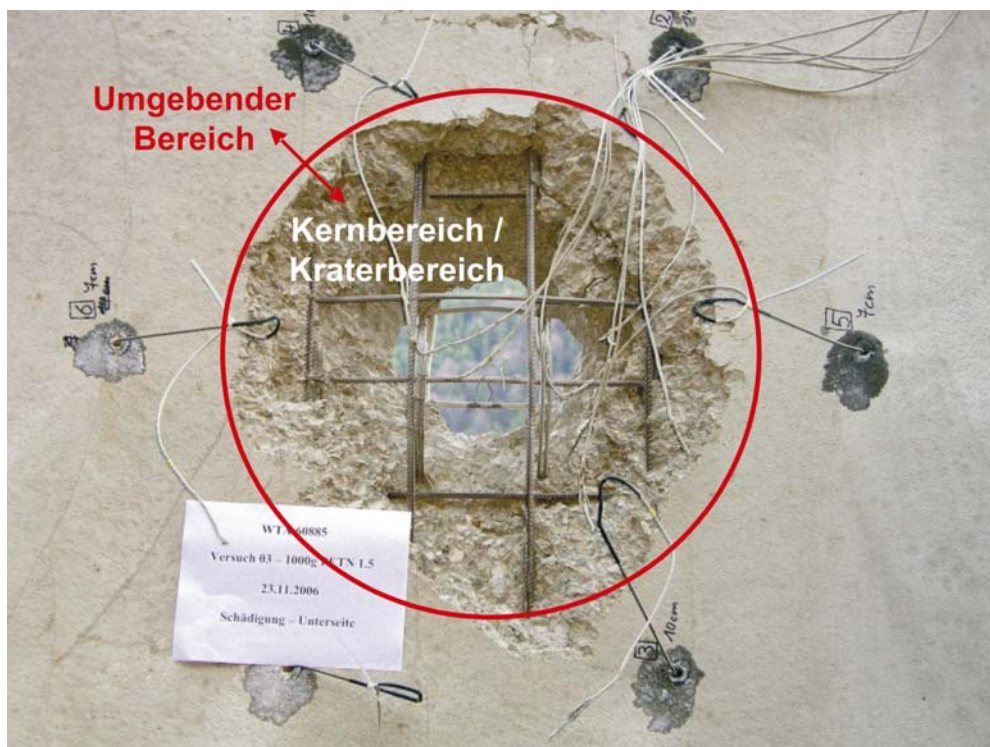


Bild 1: Schädigungsbereich einer Stahlbetonplatte nach Kontaktdetonation.

Kenntnis über das Ausmaß des gesamten Schädigungsbereichs des aus sichtbaren und äußerlich nicht erkennbaren Anteilen bestehenden Schadens ist sowohl für eine Beurteilung der Resttragfähigkeit und somit der Standsicherheit als auch für weitere Schritte wie eine Instandsetzung des Schadens von essentieller Bedeutung. Die Verfasser führten hierzu umfangreiche Untersuchungen zur Beurteilung und Quantifizierung des Schädigungsbereichs nach außergewöhnlicher Einwirkung durch, über die in [1] berichtet wurde.

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit einer möglichen Instandsetzung des Schadens, der durch eine Kontaktdetonation hervorgerufen wurde. Aufgrund der in einem derartigen Falle nicht wiederkehrenden Rissursache liegt eine Wiederherstellung des monolithischen Bauteilgefüges durch kraftschlüssiges Verbinden der Rissufer mittels Injektion als mögliche Instandsetzungsmaßnahme nahe. Um Kenntnis über die Auswirkungen einer derartigen Rissinjektion auf das Verhalten von geschädigten Stahlbetonbauteilen zu erlangen, wurden zunächst Grundlagenversuche an ausgewählten Probekörpern, die jeweils einen Ausschnitt aus einem geschädigten Bauteil darstellen, durchgeführt. Darauf aufbauend wurden Versuche zur praktischen Anwendung an Stahlbetonplatten, die durch Kontaktdetonation geschädigt waren, durchgeführt. Der Beitrag schließt mit einer Diskussion zur praktischen Anwendbarkeit für die Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen nach Kontaktdetonation.

2 FÜLLEN VON RISSEN UND HOHLRÄUMEN

2.1 Füllstoffe und Verfahren

Gemäß der Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen des DAfStb (kurz: RiLi SIB) [2] stehen als Verfahren für das Schließen und Abdichten von Rissen generell die Möglichkeiten der Trängung und der Injektion zur Verfügung. Beide Verfahren erlauben hierfür den Einsatz sowohl von Epoxidharz als auch von zementgebundenen Füllgütern. Für das kraftschlüssige Verbinden der Rissufer erlaubt RiLi SIB die Injektion mit EP oder ZL/ZS. Des Weiteren behandelt die RiLi SIB das dehnfähige Verbinden der Rissufer mit Füllgütern auf Polyurethanbasis.

Unter Trängung ist ein druckloses Füllen von Rissen im „Pinsel-“ beziehungsweise „Gießverfahren“ zu verstehen. Als Füllgut kommt meist Epoxidharz mit sehr geringer Viskosität zum Einsatz. Bei sehr großen Rissbreiten ist auch das Füllen mit ZL/ZS möglich.

Bei der Injektion wird das Füllgut mithilfe von Injektionsgeräten über Einfüllstutzen, so genannte Packer, unter Druck in Risse injiziert. Je nach Verfahren wird dabei zwischen Niederdruckinjektion und Hochdruckinjektion unterschieden. Eine eindeutige Abgrenzung der beiden Verfahren existiert nicht, jedoch werden in der Literatur und in einigen neuen Regelwerken (z.B. Richtlinie „Injektionstechnik“ des ÖVBB [3]) Verfahren, die mit Drücken bis zu 10 bar arbeiten als Niederdruckinjektionen bezeichnet. Demgegenüber verfügen Geräte zur Durchführung von Hochdruckinjektionen in der Regel über eine Druckregelung von null beginnend bis ca. 500~bar. Grundsätzlich gilt die Regel, dass die besten Füllergebnisse durch lange Injektionszeiten bei niedrigeren Drücken erzielt werden. Sind bei einer abdichtenden

Injektion gegen drückendes Wasser höhere Injektionsdrücke erforderlich, so sollte der Maximaldruck in etwa ein Drittel der Nennfestigkeit des Betons nicht überschreiten, um Gefügestörungen im Beton zu vermeiden und die Gefahr, den Riss während der Injektion zu verlängern (Reißverschlusseffekt), zu minimieren [4, 5].

Im Niederdruckverfahren kann beispielsweise mit Schlauchpumpe, Drucktopf oder Selbstinjektoren injiziert werden. Letztere arbeiten mit zwei unterschiedlichen Prinzipien: bei einem Prinzip baut sich beim Befüllen mit Füllgut im expandierendem Gummischlauch ein Druck von maximal 3~bar auf, während das zweite Prinzip mit einer vorgespannten Spiralfeder und einem Druck kleiner 1~bar arbeitet (Bild 2). Gebräuchliche Injektionsgeräte für Hochdruckinjektionen sind Membran- und Kolbenpumpen, die in einkomponentige (1-K) und zweikomponentige (2-K) Anlagen unterschieden werden [6].



Bild 2: Selbstinjektor für Niederdruckinjektion.

Das Füllen von Rissen und Hohlräumen war und ist ein Feld intensiver Forschung. Eine umfangreiche Zusammenfassung des aktuellen Kenntnisstandes zum Füllen von Rissen und Hohlräumen findet sich bei Eßer [6].

2.2 Eignung bei Schädigungen infolge Kontaktdetonation

Da es sich bei den im vorliegenden Beitrag behandelten Schädigungen infolge Kontaktdetonation um nicht wiederkehrende Beanspruchungen und somit um eine nicht wiederkehrende Rissursache handelt, können die entstandenen Risse kraftschlüssig verpresst bzw. getränkt werden. Wie beispielsweise in [1] und [7] beschrieben, sind Schäden infolge Kontaktdetonation durch Abplatzungen und Schollenbildung im direkten Zielbereich sowie durch radiale und konzentrische Risse im umgebenden Bereich gekennzeichnet. Für den Anwendungsfall der Instandsetzung derartiger Schäden scheint aufgrund der Anwendungsbedingungen sowohl die Verwendung von Epoxidharz für geringere Rissbreiten als auch von Zementsuspension für den Bereich größerer Rissbreiten und Hohlstellen als

sinnvoll. Um eine weitere Schädigung des Bauteils durch zu hohe Injektionsdrücke zu verhindern, kommen als Verfahren nur die Niederdruckinjektion und die Tränkung in Frage. Mit letzterem Verfahren kann – entgegen der üblichen Anwendung zum oberflächlichen Schließen der Risse – bei geeigneten Randbedingungen ebenso eine kraftschlüssige Verbindung der Rissufer erzielt werden.

3 UNTERSUCHUNGEN ZU DEN AUSWIRKUNGEN EINER RISSINJEKTION

3.1 Vorbemerkungen

Das sich einstellende Rissbild bei bewehrten Stahlbetonplatten nach punktueller hochdynamischer Einwirkung ist durch radiale und tangentiale Risse gekennzeichnet. Die tangential verlaufenden Risse sammeln sich meist entlang der Bewehrungsachsen. Zudem kommt es insbesondere bei zweiachsig angeordneter Bewehrung häufig zur Ausbildung einer Rissebene auf Höhe der Bewehrungslage infolge der örtlichen Schwächung des Betonquerschnittes durch die vorhandenen Bewehrungsstäbe. Diese Rissbildung in Bewehrungsebene und entlang der Bewehrungsstäbe führt zu einer Beeinträchtigung des Verbundes zwischen Stahl und Beton. Das Verbundverhalten von Bewehrungsstäben in Betonbauteilen mit Querkraft, also in Bauteilen, die über eine Längsrissbildung entlang der Bewehrung verfügen, wurde in der Vergangenheit bereits mehrfach untersucht (z.B. [8, 9]). Aufbauend auf diesen aus der Literatur bekannten Erkenntnissen und dem sich einstellenden Rissbild nach außergewöhnlicher Einwirkung wurden eigene Untersuchungen zum Verbundverhalten nach einer Instandsetzung mittels Injektion durchgeführt. Verwendet wurden dabei verschiedene Versuchskörper (einfach bewehrter Zugstab; Pull-Out-Körper) sowie verschiedene Instandsetzungsverfahren und Materialien zum Füllen der Risse (Niederdruckinjektion mit Zementsuspension, Tränkung mit Epoxidharz). Neben der Untersuchung der Auswirkungen von Rissinjektionen auf das Verbundverhalten wurden auch Versuche zum Verhalten des mittels Injektion instand gesetzten Betongefüges im gedrückten Bereich durchgeführt.

3.2 Versuche am Stahlbetonzugstab

Das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton im gezogenen Bereich kann gut an mithilfe eines Stahlbetonzugkörpers beschrieben werden. Daher wurde für experimentelle Untersuchungen zum Einfluss einer Instandsetzung mittels Injektion auf die Steifigkeit und das Tragverhalten eines Stahlbetonbauteils der einaxiale Zugversuch am Stahlbetonzugstab gewählt. Ziel der Untersuchungen ist die Klärung der Frage nach einer mögliche Wiederherstellung des Ausgangszustandes eines Zugstabes aus Stahlbeton bei Längsrissbildung, die zu einer Verbundschädigung zwischen Bewehrungsstab und Beton führt (vgl. [9]). Betrachtet wird dabei der Einfluss einer Instandsetzung mittels Injektion mit Feinstzementsuspension (ZS) auf das Trag- und Verformungsverhalten, gekennzeichnet durch die Dehnsteifigkeit. Hierzu wurden vergleichende Versuche mit Zugstäben mit (instand gesetztem) Längsriss entlang der Bewehrung durchgeführt. Folgende Versuchskörper wurden für die Versuche verwendet:

1. ungeschädigte Probekörper (Referenzkörper) – Versuchsserie VPK 4
2. geschädigte Prüfkörper (Körper mit Vorschädigung in Form eines Längsrisses entlang der Bewehrung) – Versuchsserie VPK 3
3. instand gesetzte Prüfkörper (Längsrisse mit ZS verpresst) – Versuchsserie VPK 2

Um vergleichbare Aussagen zu erhalten, wurde die Anzahl der variierten Parameter möglichst klein gehalten. Als wesentliche Kenngröße wurde auf Basis einer Literaturstudie (vgl. u.a. [8, 9]) und vorangegangenen Untersuchungen am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der UniBwM (vgl. [9]) die Rissbreite identifiziert. Die verwendeten Probekörper wurden folglich mit Rissen verschiedener Rissbreiten versehen und entsprechend gruppiert.

Als Versuch wurde in Anlehnung an [9] der einaxiale Zugversuch an einem Stahlbetonzugstab der Abmessungen 700 x 150 x 150 mm ($l \times b \times h$) gewählt. Der Zugstab wurde mit einem zentrisch angeordneten Bewehrungsstab des Durchmessers $d_s = 14$ mm ausgeführt. Bild 3 zeigt schematisch den Versuchskörper (links) sowie den Versuchsaufbau in der Prüfmaschine (rechts). Es kam Beton der Festigkeitsklasse C 20/25 und Betonstahl der Güte BSt 500 gemäß DIN 1045-1 zum Einsatz.

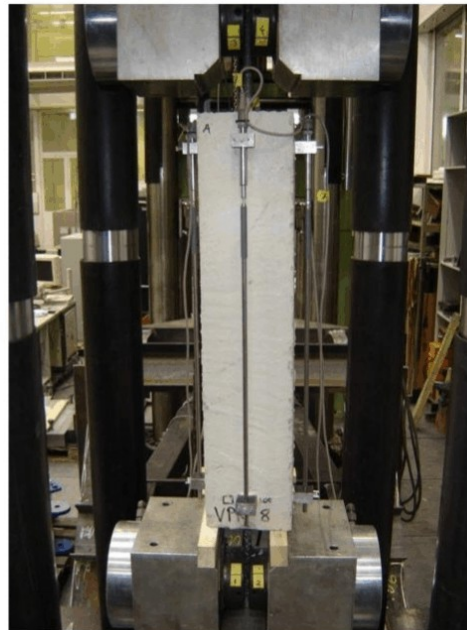
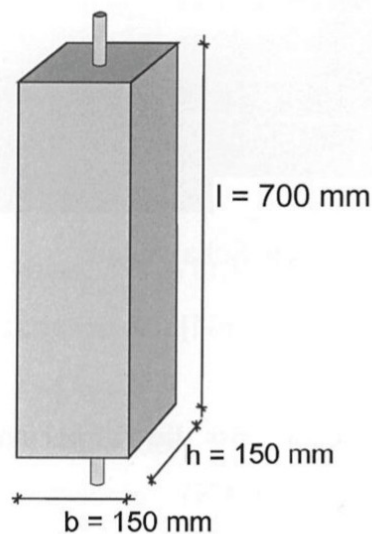


Bild 3: Versuchskörper (links) und einaxialer Zugversuch (rechts).

Als Vorschädigung wurde bei den Probekörpern ein bewehrungsparalleler Riss, der eine Verbundschädigung im Bauteil bewirkt, vor dem Zugversuch mit Hilfe einer Spaltzugbelastung längs zur Bauteilachse induziert.

Um ein Auseinanderfallen der Probekörper zu verhindern, waren diese mit Querbewehrung in Form von Bügeln versehen. Durch den Grad der Querbewehrung war in gewissem Maße eine Steuerung der Rissbreite vorzunehmen. Eine definierte Rissbreite ließ sich durch eine derartige Konstruktion jedoch nicht einstellen. Die Rissbreiten bewegten sich im Bereich von $w = 0,05$ mm bis $w = 1,0$ mm.

Der induzierte Riss wurde im nächsten Schritt mittels Feinstzementsuspension verpresst und das Bauteil somit instand gesetzt. Als Verfahren kam eine Niederdruckinjektion mit einem konstanten Injektionsdruck von 5 bar zum Einsatz, die mithilfe einer 1-K-Anlage durchgeführt wurde. Als Füllmaterial wurde eine handelsübliche Feinstzementsuspension verwendet, die für Anwendungen gemäß RiLi SIB [2] über eine bauaufsichtliche Zulassung verfügt.

Nach Setzen der Packer und Aufbringen der Verdämmung, erfolgte zunächst die Prüfung der Durchgängigkeit des Rissystems mit Wasser, um im Anschluss die Injektion mit mittels Dispersierscheibe fein aufgeschlossener Suspension durchzuführen (Bild 4).



Bild 4: Verpressen der Versuchskörper mit Zementsuspension.

Nach Aushärten der Zementsuspension wurde an den Versuchskörpern der einaxiale Zugversuch weggesteuert durchgeführt. Getestet wurden hierbei ungeschädigte, geschädigte (mit bewehrungsparallelem Längsriss) und mittels Injektion instand gesetzte Zugstäbe. Die Verformung längs der Bauteilachse wurde mit Hilfe von vier seitlich am Versuchskörper angebrachter induktiver Wegaufnehmer aufgezeichnet (siehe Bild 3). Die aufgenommenen Weggrößen an allen vier Bauteilseiten wurden gemittelt und mit dem gemessenen Kolbenweg der Prüfmaschine (beinhaltet elastische Dehnung der Längsbewehrung) abgeglichen.

Das Versuchsergebnis zeigt, dass sich durch die Instandsetzungsmaßnahme eine Erhöhung der Dehnsteifigkeit des Stahlbetonzugstabes im Bereich der sukzessiven Rissbildung erzielen lässt. Nach Erstrissbildung konnte ein steiferes Bauteilverhalten, d.h. eine größere Mitwirkung des Betons auf Zug festgestellt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der dargestellte instand gesetzte Probekörper bereits vor Versuchsbeginn einen Querriss über die halben Querschnittsbreite aufwies, sodass die Erstrissbildung schon deutlich früher einsetzte. Die übertragbaren Verbundspannungen zwischen Beton und Bewehrungsstab und damit die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen blieben davon jedoch unberührt und konnten im Vergleich zu dem geschädigten und nicht verpressten Referenzprobekörper erhöht werden.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass das Verbund- und Mitwirkungsverhalten verpresster Körper maßgeblich durch den Verpresserfolg der instand gesetzten Risse beeinflusst wird. Probekörper, die sich gut verpressen ließen, d.h. viel Füllmaterial aufgenommen haben, weisen auch ein steiferes Bauteilverhalten auf. Der Verpresserfolg ist jedoch wiederum in erheblichem Maße von der Rissweite abhängig, da die Möglichkeit der Aufnahme des Füllmaterials maßgeblich durch die Rissweite und die Durchgängigkeit der Risse beeinflusst wird. Generell lässt sich anhand der durchgeführten Versuche folgende Aussage treffen: je größer die Rissweite w , desto erfolgreicher ist die Injektion mit Feinstzementsuspension. Die größte Steifigkeitserhöhung des Bauteils konnte bei einer Rissbreite von ca. $w = 0,5$ mm erzielt werden. Ist aber die Rissweite sehr groß ($w > 0,5$ mm), so ist zwar der Verpresserfolg sichergestellt. Dennoch wurde für diesen Fall im Versuch nur eine geringe Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen erzielt. Eine mögliche Erklärung für ein derartiges Verhalten bei großen Rissweiten ist das Fehlen eines Verzahnungsmechanismus zwischen den Rippen des Bewehrungsstahls und dem Beton, sofern die Rissweite die doppelte Rippenhöhe h_f des Bewehrungsstabes übersteigt. Das Injektionsgut selbst weist einen im Vergleich zum Beton zu geringen E-Modul auf, um einen erkennbaren Verzahnungsmechanismus zu aktivieren.

3.3 Ausziehversuche

Das Verbundverhalten von Bewehrungsstahl in Beton lässt sich allgemein durch Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen beschrieben. Zur Bestimmung derartiger Beziehungen werden in den entsprechenden RILEM Recommendations [10] so genannte Beam-Tests oder Pull-Out-Tests vorgeschlagen. Bei letzteren handelt es sich um Ausziehversuche, bei denen der über eine bestimmte Verbundlänge l_b einbetonierte Stab aus dem in der Regel würfelförmigen Prüfkörper herausgezogen wird. Als angenäherte Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung wird die aus der angreifenden Kraft F errechnete, über die Verbundlänge konstant angenommene Verbundspannung τ_b über die Relativverschiebung am spannungslosen Ende des Stabes aufgetragen.

Da aufgrund der Verbundwirkung die Längsdehnung des Stabes über die Verbundlänge abnimmt, wird auch der Schlupf mit zunehmendem Abstand zum belasteten Stabende hin kleiner. Die Annahme einer über l_b konstanten Verbundspannung ist damit eine Näherung,

deren Abweichung von den wirklichen Verhältnissen mit zunehmender Verbundlänge größer wird. Für weitere Informationen und Besonderheiten zu Ausziehversuchen zur Ermittlung von Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen wird auf [11] verwiesen.

In Anlehnung an Untersuchungen von Schmidt-Thrö et al. [12] wurden für die nachfolgend beschriebenen Pull-Out-Versuche an RILEM angelehnte Probekörper mit einer Verbundlänge von $3 d_s$ gewählt, um das Risiko einer (weiteren) Sprengrissbildung zu vermeiden und somit eine wirklichkeitsnähere Abbildung des Verbundverhaltens im gerissenen Bauteil zu erzielen.

Die durchgeführten Pull-Out-Versuche dienen zum besseren Verständnis und zur Beschreibung des Verbundverhaltens von Stahlbetonbauteilen, deren Riss entlang der Bewehrungsachsen mittels Epoxidharz-Tränkung instandgesetzt wurde. Als Instandsetzungsverfahren wurde bewusst die Tränkung (druckloses Füllen von Rissen) gewählt um

1. die Kraftschlüssigkeit derartig verbundener Rissufer und
2. deren Wirkung im oberflächennahen Bereich (vgl. Kraterbereich) nachzuweisen sowie
3. ein einfaches und schnelles Verfahren ohne großen Geräteeinsatz anzuwenden.

Ziel der Untersuchungen ist die Klärung der Frage nach einer mögliche Wiederherstellung des Ausgangszustandes hinsichtlich des Verbundverhaltens von Bewehrungsstäben in Beton bei Längsrissbildung. Betrachtet wird dabei der Einfluss einer Instandsetzung mittels Epoxidharz-Tränkung auf das Verbundverhalten, gekennzeichnet durch die zwei Aspekte „Verbundsteifigkeit“ und „maximal übertragbare Verbundspannung“. Dazu wurden vergleichende Pull-Out-Versuche mit folgenden Versuchskörpern durchgeführt:

1. ungeschädigte Pull-Out-Körper (Referenzkörper) – Versuchsserie V1-R
2. geschädigte Pull-Out-Körper (Körper mit Vorschädigung in Form eines definierten Längsrisses entlang der Bewehrung) – Versuchsserie V1-S
3. instand gesetzte Pull-Out-Körper (definierte Risse in Körper mit EP getränkt) – Versuchsserie V1-I

Um vergleichbare Aussagen zu erhalten, wurde die Anzahl der variierten Parameter möglichst klein gehalten. Als Versuchskörper diente ein Pull-Out-Körper in Anlehnung an [12] mit der Kantenlänge $10 d_s = 160$ mm. Als Bewehrungsstab wurde ein Betonstabstahl aus BSt 500 mit einem Stabdurchmesser von $d_s = 16$ mm gewählt. Wie schon bei den Stahlbetonzugkörpern wurde als wesentlicher Parameter die Rissbreite identifiziert und folglich variiert.

Der bewehrungsparallele Riss, der eine Verbundschädigung im Bauteil bewirkt, wurde vor dem Ausziehversuch mithilfe einer Spaltzugbelastung längs zur Bewehrungsachse induziert und mittels einer speziell entwickelten Konstruktion, bestehend aus zwei starr mit dem Betonkörper verbundenen Ankerplatten und vier Gewindestangen mit Kontermuttern, auf die gewünschte Rissbreite ($w = 0,15$ mm oder $w = 0,30$ mm) eingestellt (siehe Bild 5). Die Risse

der Probekörper wurden in einem nächsten Schritt mittels eines sehr niedrigviskosen Epoxidharzes getränkt und der Probekörper somit instand gesetzt.

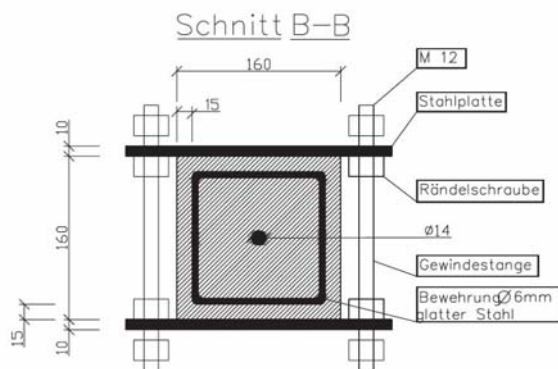


Bild 5: Vorrichtung zur Einstellung der Rissbreiten: Konstruktion und Ausführung.

Nach Instandsetzung wurde an den Versuchskörpern der Ausziehversuch weggesteuert durchgeführt. Vergleichend getestet wurden hierbei ungeschädigte, geschädigte (mit bewehrungsparallelem Längsriss) und mittels Tränkung instand gesetzte Pull-Out-Körper. Die Relativverformung längs der Bewehrungsachse wurde mithilfe eines am spannungslosen Ende des Bewehrungsstabes angebrachten induktiven Wegaufnehmers aufgezeichnet.

Die Untersuchung von ungeschädigten Referenzkörpern wurde erforderlich, um eine Aussage über den Erfolg der Instandsetzungsmaßnahmen bezüglich der Verbundfestigkeit der Prüfkörper zu treffen. Im ungerissenen Zustand verteilt sich die angreifende Kraft näherungsweise im Verhältnis der Steifigkeiten auf die beiden Werkstoffe Stahl und Beton. Treten in Stahlbetonbauteilen bei steigender Beanspruchung Risse im Beton auf, so fällt die Betonspannung in den Rissquerschnitten auf Null ab. Die mittlere Maximallast der Referenzprobekörper beträgt 67,3 kN. Die relativ hohen Risskräfte der gesamten Versuchsreihen lassen sich auf die Versuchskörpergeometrie (Gewölbetragswirkung) und den Einschnüreffekt durch einen eingelegten Bügel, der das Auseinanderfallen des Probekörpers nach Induzierung des Risses verhindert, zurückführen. Die vergleichende Betrachtung ungeschädigter, geschädigter und instand gesetzter Körper bleibt davon jedoch unberührt.

Das in Bild 6 exemplarisch dargestellte Ergebnis der Ausziehversuche zeigt, dass sich durch die Instandsetzungsmaßnahme eine Erhöhung der übertragbaren Verbundspannung im Verbundbereich grundsätzlich erzielen lässt. Dies lässt sich vor allem damit begründen, dass durch eine Injektion oder Tränkung mit Epoxidharz im Bereich des Risses die Materialeigenschaften des EP vorliegen. Die erreichbare Zugfestigkeit von EP liegt über der des Betons. Dies führt dazu, dass bei erneuter Belastung ein neuer Riss direkt neben dem injizierten Riss entsteht und somit die Kennwerte des Betons maßgeblich werden. Es bleibt

jedoch festzuhalten, dass durch eine Injektion des Verbundbereichs der mechanische Verzahnungsmechanismus zwischen Beton und Stahl nicht in dem Maße instand gesetzt wird, wie dies bei einem Körper mit ungestörtem Verbund (ungeschädigter Probekörper) der Fall ist. Somit lassen sich die geringeren übertragbaren Verbundspannungen im Vergleich zum ungeschädigten Probekörper erklären.

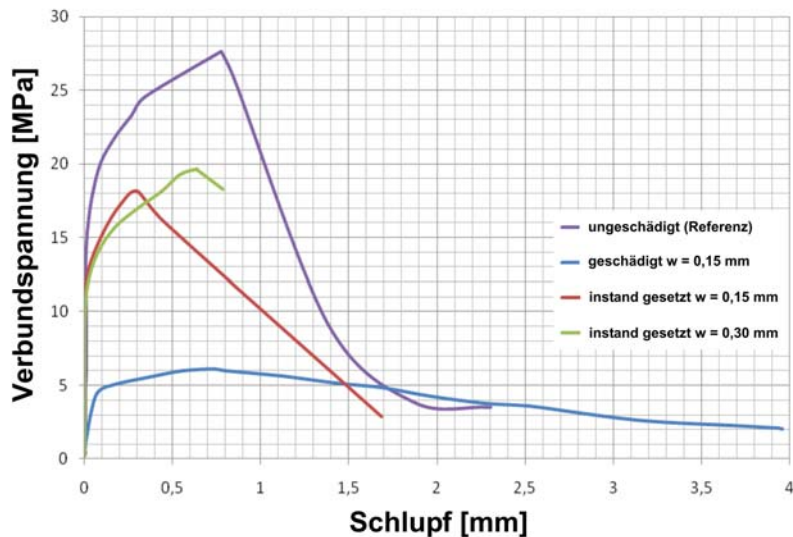


Bild 6: Vergleichendes Ergebnis der Ausziehversuche.

Hinsichtlich der Verbundsteifigkeit lässt sich festhalten, dass diese primär von der Rissöffnung des entstehenden Längsrisse abhängig ist und nicht von der Instandsetzung selbst. Durch eine Injektion oder Tränkung mit Epoxidharz erfährt der Verbundbereich eine Verbesserung hinsichtlich der Zugfestigkeit (Haftverbund), nicht jedoch eine verbesserte mechanische Verzahnung (Scherverbund). Folglich ergibt sich in Hinblick auf die Verbundsteifigkeit, die anfänglich vor allem durch den Haftverbund gekennzeichnet ist, ein dem ungeschädigten Fall sehr ähnliches Verhalten.

Die durchgeführten Versuche zeigen zudem, dass das Verbundverhalten maßgeblich durch den Tränkungserfolg der instand gesetzten Risse beeinflusst wird. Dieser ist wiederum in erheblichem Maße von der Rissweite abhängig. Generell lässt sich für den Bereich geringer Rissbreiten (bis $w = 0,30$ mm) festhalten, dass die Tränkung mit Epoxidharz umso erfolgreicher verläuft, je größer die Rissweite w ist.

Ferner zeigten die Versuche, dass bei Verwendung der Tränkung als Instandsetzungsverfahren (= keine Rissinjektion gemäß DAfStB RiLi SIB und ZTV-ING) eine kraftschlüssige Verbindung der Rissufer bzw. des Betons mit dem Bewehrungsstab erzielt werden kann. Das Verfahren bietet im Falle einer schnellen Ausführung aufgrund des geringen Material- und Geräteeinsatzes gute Einsatzmöglichkeiten, sofern es sich bei den

Rissen im Wesentlichen um Risse mit einer ausreichenden oberflächlichen Rissbreite ($w \geq 0,15$ mm) handelt, die mittels des Mechanismus des kapillaren Saugens das Füllmaterial gut in das Innere des Bauteils weiterleiten.

3.4 Würfeldruckversuche

Neben den Versuchen zum Verbundverhalten instand gesetzter Stahlbetonbauteile wurden Versuche zum Verhalten des mittels Injektion instand gesetzten Betongefüges im gedrückten Bereich durchgeführt. Hierzu wurde als Versuch der klassische einaxiale Druckversuch mit Würfeln der Abmessungen 200 x 200 x 200 mm (l x b x h) gewählt.

Die Seitenlänge der Würfel wurde auf 200 mm festgelegt, um eine Niederdruckinjektion mit Selbstinjektor ausführen zu können. Als Beton wurde Normalbeton der Druckfestigkeitsklasse C 40/50 gemäß DIN 1045-1 verwendet. Als wesentlicher Parameter der Versuchsreihe wurde der Winkel zwischen der angreifenden Druckkraft und dem Riss variiert (siehe Bild 7).

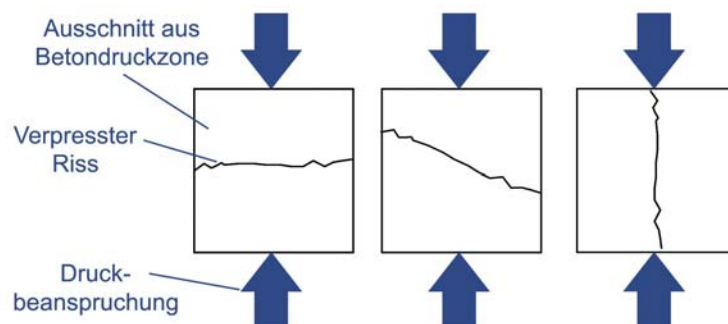


Bild 7: Grundgedanke zu den durchgeführten Druckversuchen.

Ziel der Untersuchungen ist die Frage nach den Auswirkungen einer Injektion auf das Verhalten des instand gesetzten Betongefüges im gedrückten Bereich. Betrachtet wird dabei die Auswirkung einer Instandsetzung mittels Epoxidharz-Niederdruckinjektion im einaxialen Druckversuch an würfelförmigen Probekörper. Dazu wurden vergleichende Druckversuche mit folgenden Versuchskörpern durchgeführt:

1. ungeschädigte Würfel (Referenzkörper) – Versuchsserie R
2. geschädigte Würfel (Körper mit Vorschädigung in Form eines Risses in einem definierten Winkel) – Versuchsserie S
3. instand gesetzte Würfel (Risse in Körper mit EP verpresst) – EP

Die Gefügestörung im gedrückten Bereich wurde durch einen Riss simuliert, der vor dem Druckversuch mithilfe einer Spaltzugbelastung induziert wurde. Um ein Auseinanderfallen des Würfels infolge Spaltzugbeanspruchung zu verhindern, wurde bei der Betonage ein

kurzes Stück Rödeldraht quer zur Rissrichtung eingelegt. Die Risse der Probekörper wurden im nächsten Schritt mittels Selbstinjektor mit sehr niedrigviskosem Epoxidharz injiziert und das Bauteil somit instand gesetzt.

Nach Instandsetzung und Aushärtung des Harzes wurde an den Versuchskörpern der einaxiale Druckversuch kraftgesteuert durchgeführt. Getestet wurden hierbei ungeschädigte, geschädigte (gerissene) und mittels Niederdruckinjektion instand gesetzte Würfel. Das gemittelte Ergebnis der vergleichenden Untersuchung ist in Bild 8 dargestellt. Bis auf einen Probekörper zeigten alle Versuchskörper ein klassisches Würfelversagen (Versagensform „Sanduhr“).

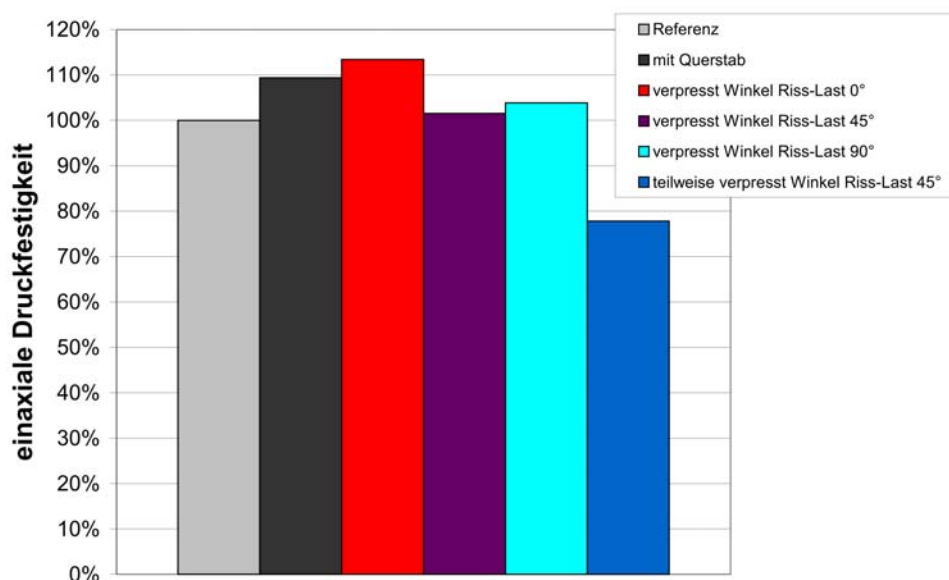


Bild 8: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche an Würfeln ($a = 200 \text{ mm}$).

Als wesentliches Versuchsergebnis lässt sich festhalten, dass bei den verpressten Würfeln unabhängig vom jeweiligen Last-Riss-Winkel eine Erhöhung der Druckfestigkeit gegenüber dem ungeschädigten Referenzkörper durch die Instandsetzung beobachtet werden konnte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass beim einaxialen Druckversuch die aufnehmbare Grenzdruckkraft durch die Querkzugfestigkeit des Probekörpers bestimmt wird. Dieser Effekt fällt bei Würfeln als Probekörperform zudem noch ausgeprägter aus als bei zylindrischen Probekörpern. Da die Zugfestigkeit des Harzes deutlich größer ist als die des umgebenden Betons kommt die Instandsetzung sogar einer Verbesserung gegenüber dem ungeschädigten Zustand gleich. Folglich lässt sich so auch erklären, dass der Erhöhungseffekt bei einem Last-Riss-Winkel von 0° am Deutlichsten ausfällt (Verbesserung der Querkzugfestigkeit über die gesamte Würfelhöhe). Der beobachtete Effekt lässt sich vergleichen mit dem einer Verbügelung oder einem eingelegten Querstab zur Aufnahme der Zugkräfte quer zur Lastrichtung (vgl. auch Bild 8; schwarze Säule).

Wird ein Riss nur teilweise verpresst bzw. ist die Injektion beispielsweise aufgrund zu geringer Rissbreiten nicht erfolgreich, ist die aufnehmbare Druckspannung signifikant kleiner als im ungeschädigten Bereich (siehe Bild 8; blaue Säule). Dies lässt die Bedeutung einer Instandsetzung des Betongefüges im gedrückten Bereich erkennen.

4 PRAXISVERSUCHE AN STAHLBETONPLATTEN

4.1 Versuchskonzept und Probekörper

Um den Nachweis der praktischen Anwendbarkeit von Injektionsverfahren zur Instandsetzung außergewöhnlich geschädigter Stahlbetonbauteile zu erbringen, wurden Eignungsversuche an angespannten (Stahl-)betonplatten durchgeführt. Dabei handelte es sich um bewehrte und unbewehrte Platten der Abmessungen 200 cm x 200 cm x 30 cm aus Normalbeton der Festigkeitsklasse C 30/37. Die Platten, die aus einer Versuchsserie zum Schädigungsverhalten stammen (vgl. [13]) und bereits für Versuche zur Schadensidentifikation verwendet worden sind (vgl. [1]), wurden jeweils mit einer Kontakt- bzw. Nahdetonation beaufschlagt, wobei verschiedene Sprengstoffmengen zwischen 400 g PETN und 2750 g PETN verwendet wurden.

4.2 Durchführung und Ergebnisse



Bild 9: Geschädigte Stahlbetonplatte, vorbereitet zur Injektion.

Aufgrund der bisherigen Erfahrung mit verschiedenen Injektionsverfahren und Füllgütern wurde als Instandsetzungsverfahren die Niederdruckinjektion mit Epoxidharz und Selbstinjektor gewählt, da dieses Verfahren durch eine gute Handhabbarkeit und kompaktes Gerät gekennzeichnet ist. Die Platten wurden durch Verdämmung und Setzen der Klebpacker zur Injektion vorbereitet (Bild 9) und anschließend verpresst (Bild 10).



Bild 10: Anwendung der EP-Injektion mittels Selbstinjektor bei angesprengten Platten.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass das gewählte Verfahren bei den vorliegenden Platten grundsätzlich gut einsetzbar ist. Im Einzelnen bedeutet dies, dass sich die Injektion planmäßig durchführen ließ und dass der Probekörper teilweise mehr, teilweise weniger Füllmaterial aufgenommen hat. Voraussetzung hierfür ist jedoch die genaue Erfassung und Beurteilung des Ist-Zustandes und folglich die Auswahl der Injektionspunkte (Packerpositionierung). Des Weiteren ist die Erfüllung der zur Anwendung erforderlichen Randbedingungen hinsichtlich Rissbreite und Feuchtezustand des Bauteils Grundvoraussetzung.

Bei den Injektionsversuchen wurde beobachtet, dass eine Injektion um so leichter durchzuführen ist, je näher sie am Kraterrand durchgeführt wird, d.h. je näher die Klebepacker am Kraterrand positioniert wurde. Dies lässt auf ein durchgängigeres Rissystem und ein weniger dichtes Betongefüge im unmittelbar umgebenden Bereich schließen. Diese Erkenntnis stimmt gut mit den Ergebnissen der zerstörungsfreien Prüfung mit dem Impact-Echo- und Radarverfahren überein (vgl. [1]). Jedoch muss angeführt werden, dass teilweise eine Injektion aufgrund zu geringer Rissbreiten und einem nicht durchgängigen Rissystem auch in Bereichen nahe dem Kraterrand nicht erfolgreich durchgeführt werden konnte.

Ferner kann festgehalten werden, dass zum erfolgreichen Injizieren Erfahrung im Umgang mit dem Selbstinjektor und dem Füllgut erforderlich ist. Der Injektionserfolg hängt beispielsweise auch vom aufgebrachtem Injektionsdruck und einem etwaigen Nachinjizieren ab.

5 DISKUSSION UND FOLGERUNGEN

Generell zeigen die durchgeführten experimentellen Untersuchungen, dass Injektionsverfahren für die Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen mit Schäden infolge außergewöhnlicher Einwirkung grundsätzlich geeignet sind. Dabei wurden als typische Bauteile Stahlbetonplatten (vergleichbar mit Fahrbahnplatten von Massiv- und

Verbundbrücken) und als repräsentative außergewöhnliche Einwirkung eine Kontaktdetonation (vergleichbar mit kriegsbedingter Waffenwirkung) gewählt. Sofern sich die Schädigung auf einen lokalen Bereich beschränkt und durch die Schädigung die globale Tragfähigkeit des Bauwerks nicht gefährdet ist, kann eine Instandsetzung des geschädigten Bereiches lediglich mit Injektionsverfahren in Kombination mit einem Betonersatz im Kraterbereich erfolgen. Sind Auswirkungen der Schädigung auf das globale Trag- und Verformungsverhalten zu erwarten, ist eine Kombination mit konstruktiven Verstärkungen zu empfehlen. Derartige Instandsetzungsverfahren und Verstärkungen können beispielsweise

- Reprofilierungen mittels Ortbeton,
- Spritzbetonverstärkungen,
- Aufbetonverstärkungen,
- Bewehrungsergänzung mittels eingeklebten Bewehrungsstäben,
- oberflächlich applizierte Bewehrungen aus Faserverbundwerkstoffen (CFK, GFK, Aramid) oder
- zusätzlich angeordnete externe Vorspannung sein.

Die Kombination von Riss- und Hohlraumfüllungen mit konstruktiven Verstärkungen sind sowohl mit EP als auch mit ZL/ZS als Füllstoff möglich. Die Einsatzbedingungen für verschiedene Füllgüter lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Risse mit großer Rissbreite ($w > 0,40$ mm) und Hohlräume (z.B. unter abgelösten Schollen) können grundsätzlich erfolgreich mit Zementleim bzw. Zementsuspension (ZL/ZS) gefüllt werden.
- Risse mit geringeren Rissbreiten ($0,10$ mm $\leq w \leq 0,40$ mm) können grundsätzlich erfolgreich mit Epoxidharz (EP) gefüllt werden.
- Der Einsatz von zementbasierten Füllgütern bietet sich bei sehr feuchten oder wasserführenden Rissen an.
- Der Einsatz von Epoxidharz beschränkt sich auf trockene oder nur sehr wenig feuchte Rissflanken.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen bei der Anwendung der Injektionsverfahren zur Instandsetzung durch außergewöhnliche Einwirkung geschädigter Stahlbetonbauteile werden folgende Empfehlungen formuliert:

- Grundsätzlich wird aufgrund der Anwendungskriterien primär Epoxidharz als Füllgut empfohlen. Es ist ein sehr niedrigviskoses Epoxidharz vorzuziehen. Der Feuchtezustand des Bauteils ist dabei angemessen zu berücksichtigen.
- Als Verfahren werden zur Vermeidung einer weiteren Schädigung des Bauteils durch zu hohe Injektionsdrücke die Trängung oder die Niederdruckinjektion empfohlen.
- Bei Ausführung einer Niederdruckinjektion empfiehlt sich die Anwendung von Selbstinjektoren aufgrund der guten Handhabbarkeit und des kompakten Gerätes.

- Sehr große Fehlstellen müssen unabhängig von einer Injektion mit Betonersatz repariert werden (z.B. polymermodifizierte Betone oder schwindarme Vergussmörtel).

Der primäre Einsatz von Epoxidharz ist den im Kraterbereich und im umgebenden Bereich zu erwartenden Rissen mit kleinen Rissbreiten $w \leq 0,10$ bis $0,25$ mm geschuldet. Durch die marktüblichen geringen Gebindemengen von Epoxidharz ist zudem der Einsatz bei entsprechend kleinen Schädigungsbereichen vorteilhaft. Die Wahl des Verfahrens (Tränkung oder Niederdruckinjektion mittels Selbstinjektor) hängt vom Einzelfall ab und muss vom Planer und/oder Anwender individuell entschieden werden.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass der Erfolg einer Instandsetzungsmaßnahme an geschädigten Bauteilen nur bedingt verifiziert werden kann (z.B. durch die Menge des aufgenommenen Füllgutes). Quantitative Aussagen zu den Auswirkungen auf Festigkeit und Steifigkeit instand gesetzter Bereiche von Stahlbetonbauteilen lassen sich nach Meinung der Verfasser nicht angeben. Dies ist in der großen Streuung der Einflussparameter sowohl auf Seiten der Einwirkung (Art und Größe) als auch auf Seiten des Bauteilwiderstandes (Bewehrungsgrad und -lage, Festigkeit, Gefüge, Rissbildungszustand) begründet.

Bei allen durchgeführten Versuchen handelt es sich um Tastversuche, um die Anwendbarkeit von Verfahren zum kraftschlüssigen Füllen von Rissen bei Schädigungen in Stahlbetonbauteilen infolge außergewöhnlicher Einwirkung nachzuweisen und um qualitative Aussagen zum Bauteilverhalten nach einer Instandsetzung zu erhalten. Es besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Quantifizierung und Absicherung einzelner beobachteter Effekte sowie hinsichtlich der praktischen Umsetzung unter verschiedenen Randbedingungen. Am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität der Bundeswehr München sind hierzu weitere Versuche und numerische Untersuchungen geplant (siehe auch [14]).

5 DANKSAGUNG

Die Arbeit wurde vom Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB) in Koblenz im Rahmen des Projektes „Schnellinstandsetzung beschädigter ziviler Brücken“ finanziert, wofür sich die Verfasser vielmals bedanken. Für die Durchführung der Ansprengungen sei der Wehrtechnischen Dienststelle für Schutz- und Sondertechnik (WTD 52) in Oberjettenberg gedankt. Die Injektionsarbeiten wurden teilweise vom Zentralen Labor für Baustofftechnik der Bilfinger Berger AG in Emmering bei München durchgeführt.

REFERENCES

- [1] Fuchs, M.; Keuser, M.: Stahlbetonbauteile nach außergewöhnlicher Einwirkung – Schadensquantifizierung mittels zerstörungsfreier Echo-Verfahren. Bauingenieur 83, Heft 4, S. 176 – 185, Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie des DAfStb: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen. Ausgabe Oktober 2001, Beuth Verlag, Berlin, 2001.

- [3] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: Richtlinie Injektionstechnik – Teil 1: Bauten aus Beton und Stahlbeton. Ausgabe Jänner 2008, Eigenverlag ÖVBB, Wien, 2008.
- [4] Depke, F.: Rissinjektionen. Bautenschutz und Bausanierung 3, Heft 4, S. 140 – 143, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, Köln, 1980.
- [5] Engelke, P.; Iványi, G.: Kraftschlüssiges Verpressen von Rissen in Überbauten von Massivbrücken mit Epoxidharzen. Beton- und Stahlbetonbau 80, Heft 2, S. 29 – 35 und Heft 3, S. 79 – 82, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1985.
- [6] Eßer, A.: Füllen von Rissen und Hohlräumen in Betonbauteilen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 527, Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [7] Randles, P. W.; Metcalf, J. G.: High explosive damage in rock and concrete. Proceedings of 18th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock (MABS 18), Bad Reichenhall, 2004.
- [8] Idda, K.: Verbundverhalten von Betonrippenstählen bei Querkraft. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 1999.
- [9] Keuser, M.; Purainer, R.; Brunner, S.: Bauteile aus Stahlbeton unter Zugbeanspruchung. Beton- und Stahlbetonbau 99, Heft 7, S. 552 – 560, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2004.
- [10] RILEM: Recommendations for bond test for reinforcing steel . Materiaux et Constructions 6, Nr.32, S. 97 – 105, 1973.
- [11] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau – Nach DIN 1045-1 und DIN EN 1992-1-1 . Springer Verlag, Heidelberg, 2006.
- [12] Schmidt-Thrö, G.; Stöckl, S.; Kupfer, H.: Einfluß der Probekörperform und der Messpunktanordnung auf die Ergebnisse von Ausziehversuchen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 378, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1986.
- [13] Landmann, F.: Dokumentation der Parameteruntersuchungen des Schädigungsverhaltens von Stahlbetonplatten unter Kontaktdetonation. Zwischenbericht, Wehrtechnische Dienststelle für Schutz- und Sondertechnik, Oberjettenberg, 2001.
- [14] Fuchs, M.; Keuser, M.: Instandsetzung von Rissen in Stahlbetonbauteilen nach einer außergewöhnlichen Einwirkung. Beton- und Stahlbetonbau 103, Heft 12, S. 807 – 818, Springer Verlag, Berlin, 2008.