

RELAST® – Nachhaltige und ressourcenschonende Bauwerksverstärkung mit eingeklebten Betonschrauben

Fabian Strobl M.Eng., Adolf Würth GmbH & Co. KG¹

ZUSAMMENFASSUNG

Ein Großteil der Bauwerke in Deutschland ist sanierungsbedürftig, da in vielen Fällen Defizite hinsichtlich vorhandener Querkraft- oder Durchstanzbewehrung vorhanden sind. Aus wirtschaftlicher Sicht und aus Gründen der Nachhaltigkeit sollen diese Bauwerke jedoch weiterhin verwendet, umgenutzt oder sogar vergrößert werden. Herkömmliche Verstärkungsmaßnahmen sind häufig mit hohen Kosten und einem hohen Aufwand verbunden, da das Bauwerk in der Regel von der Unter- und Oberseite aus zugänglich sein muss. Dieser Aspekt führt zu massiven Nutzungseinschränkungen während der Sanierung oder zu Fahrbahnverengungen, Sperrungen und Umleitungen, und erfordert im Falle von Brücken kostenintensive Detaillösungen zur Wiederherstellung der Tragwerksabdichtung und des Fahrbahnbelags. Aus diesen Gründen wurde am Arbeitsbereich Massivbau und Brückenbau der Universität Innsbruck ein technisch innovatives, ressourcenschonendes und wirtschaftliches Verfahren entwickelt, welches es ermöglicht Bauwerke nachträglich mit Hilfe von eingeklebten Betonschrauben (Würth Verbundankerschraube RELAST®) zu verstärken.

Aufgrund des mechanischen Verbunds der Betonschrauben zum Untergrund (Formschluss) und der zusätzlich stoffschlüssig ausgeführten Verbindung (durch Injektion eines Verbundmörtels) entsteht eine kombinierte Tragwirkung. Weitere Vorteile des Systems sind das robuste Tragverhalten im Lastfall Brand, dass das Bauwerk zur Installation nur von einer Seite aus zugänglich sein muss, die schnelle und einfache Installation unter Aufrechterhaltung des Betriebs sowie die Verwendung bei statischen, quasi-statischen und ermüdungsrelevanten Beanspruchungen.

1 EINGEKLEBTE BETONSCHRAUBEN – DAS RELAST®-SYSTEM

Um Defizite an vorhandener Querkraft- und Durchstanzbewehrung in bestehenden Strukturen auszugleichen, braucht es innovative Verstärkungssysteme. Diese müssen nicht nur eine hohe Verstärkungswirkung bei einem geringen Einsatz von Verstärkungselementen aufweisen, sondern auch eine möglichst schnelle und einfache Installation ermöglichen. Der Einsatz von eingeklebten Betonschrauben als nachträgliche Querkraft- und Durchstanzverstärkung erfüllt diese Erfordernisse. Die ursprünglich aus der Verankerungstechnik stammenden Verbundankerschrauben werden für

¹ Prof. Dr.-Ing., Technische Hochschule Mittelhessen, Fachbereich Bauwesen

den Einsatz als nachträgliche Querkraft- und Durchstanzverstärkung modifiziert, um den abgeänderten Anforderungen zu entsprechen. Während Betonschrauben als Verankerungselement externe Lasten in die Struktur ableiten müssen, werden beim Einsatz als nachträgliche Bewehrung interne Kräfte der bestehenden Struktur aufgenommen und müssen wieder in der Struktur abgeleitet werden. Dementsprechend ist es erforderlich, dass nicht nur Kräfte an der Schraubenspitze über das Verbundgewinde aufgenommen werden, sondern diese am anderen Ende der Schraube auch wieder abgeleitet werden [1]. Dafür wird bei RELAST® eine Druckverteilungsscheibe mit einer Keilsicherungsfederscheibe und eine Mutter am metrischen Gewinde der Schraube an der Außenseite des Tragwerks angeordnet (vgl. Abb. 1) Über die Mutter an der Außenseite ist es auch möglich, eine Vorspannung in der Schraube durch Andrehen mit einem definierten Anziehdrehmoment zu erzeugen.



Abb. 1: Bestandteile des RELAST®-Systems

Das Verstärkungssystem RELAST® besteht demnach aus zwei wesentlichen Bestandteilen. Zum einen der Betonschraube, bei welcher die Kräfte über den mechanischen Verbund (Formschluss, durch den Hinterschnitt des Betonschneidegewindes) ins Bauteil übertragen werden. Zum anderen aus dem Verbundmörtel, welcher eine stoffschlüssige Verbindung zum Bauteil herstellt und die Lasten über Verbundkräfte ins Bauteil einleitet. Durch die Kombination von Form- und Stoffschluss kann die Verbundankerschraube unmittelbar nach der Montage bereits Lasten aufnehmen [1]. Zur Installation der Schrauben muss das Bauwerk nur von einer Seite aus zugänglich sein. Im Falle einer Brücke kann demnach unter laufendem Verkehr von unten verstärkt werden und der bestehende Fahrbahnbelag sowie die Fahrbahnabdichtung können erhalten bleiben. Zusätzlich behält das System im Lastfall Brand einen Großteil seine Tragfähigkeit, aufgrund des dauerhaften mechanischen Verbunds zum Bauteil.

2 TRAGVERHALTEN DER VERBUNDANKERSCHRAUBEN

Wie in [1] beschrieben wird, sind Betonschrauben seit Beginn der 1990er Jahre als Verankerungselement in Stahlbetonstrukturen bekannt und wurden in den vergangenen Jahren vermehrt eingesetzt. Das Tragverhalten ähnelt dabei dem Prinzip eines eingeklebten Bewehrungsstabes, mit dem Unterschied, dass die Kraftübertragung nicht über die Rippen des Bewehrungsstabes, sondern über das relativ kurze Betonschneidegewinde stattfindet. Die großen Vorteile von Betonschrauben gegenüber anderen Systemen sind die schnelle Installation und die sofortige Belastbarkeit, welche sich

durch den mechanischen Verbund der Schraube mit der Betonstruktur ergibt. Um die Tragfähigkeit der Betonschrauben weiter zu erhöhen, wurden die sogenannten Verbundankerschrauben entwickelt, bei denen ein Verbundmörtel vor dem Eindrehen der Schrauben in das Bohrloch injiziert wird. Damit wird der existierende Ringspalt zwischen Schraube und Beton verfüllt, was durch die größere Auflagefläche des Gewindes und den Klebeverbund zu größeren Traglasten führt. Der Auszugswiderstand der Schrauben kann mittels Verklebung um etwa 40 % gesteigert werden, wie auch in [1] gezeigt wird. Das Tragverhalten der Verbundankerschraube beruht dabei auf den bereits erwähnten Effekten des Form- und Stoffschlusses, vgl. Abb. 2.

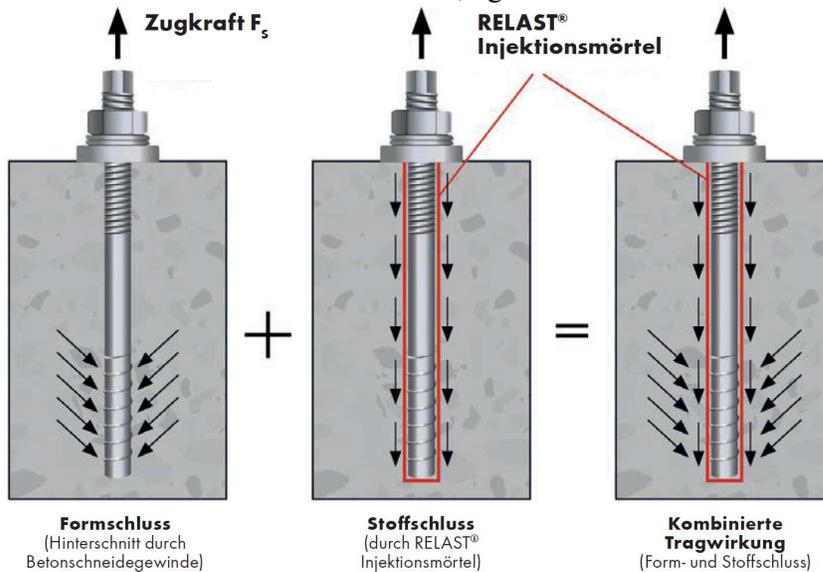


Abb. 2: Kombinierte Tragwirkung der Verbundankerschraube

3 WISSENSCHAFTLICHE UNTERSUCHUNGEN

3.1 Wissenschaftliche Untersuchungen zur Durchstanzverstärkung

Die generelle Eignung des Systems konnte bereits 2012 anhand erster Durchstanzversuche eindrucksvoll nachgewiesen werden [1]. Dazu wurden Versuchsplatten mit einer Plattendicke von 20 cm und einem Durchmesser von 2,7 m hergestellt (siehe Abb. 3). An diesen Platten wurde ein Stützenstummel vorgesehen, über welchen im Versuch mittels einer hydraulischen Presse die Durchstanzlast aufgebracht wurde. Über eine Rückverankerung an den Plattenrändern konnte so eine Durchstanzbeanspruchung einer Stahlbetonplatte auf einer Stütze als Ausschnitt modelliert werden. Anhand dieser Versuche konnte gezeigt werden, dass je nach verwendeter Schraube und Installationsart die Traglaststeigerung bei Verwendung von 32 Schrauben im Versuch um bis zu 53 % gegenüber einem Versuch ohne Durchstanzbewehrung gesteigert werden konnte.



Abb. 3: Versuchsaufbau Durchstanzverstärkung [1]

Auf Basis dieser Versuche wurden in den letzten Jahren im Zuge von zwei Forschungsprojekten weitere Durchstanzversuche mit Betonschrauben als nachträgliche Durchstanzverstärkung durchgeführt [1]. Dabei wurden weitere Parameter untersucht, wie etwa die Verklebung der Schrauben, die Setztiefe der Schrauben, die Schraubenanzahl und der Längsbewehrungsgrad in den Probekörpern. Ebenfalls wurden mehrere Versuche mit zyklischen Lasten durchgeführt, wobei gezeigt werden konnte, dass bei Belastungen zwischen einem Drittel und der Hälfte der statischen Bruchlast bei zwei Millionen Lastwechseln kein Versagen infolge dynamischer Lasten eintritt. Erst bei Wiederbelastung mit statischen Lasten konnte nach der dynamischen Lasteinwirkung das Versagen der Versuchskörper herbeigeführt werden. Entsprechend ist auch die Regelung hinsichtlich der dynamischen Lasten in den Zulassungen enthalten. Details zu diesen Versuchen und den Ergebnissen werden auch in [1] beschrieben und diskutiert.

3.2 Wissenschaftliche Untersuchungen zur Querkraftverstärkung

Unmittelbar nach der ersten Versuchsreihe zur Durchstanzverstärkung wurde an der Universität Innsbruck damit begonnen den Einsatz von Betonschrauben als nachträgliche Querkraftverstärkung zu untersuchen. Dies erfolgte anhand von Bauteilversuchen an Stahlbetonträgern mit einer Länge von 3,5 m, an denen über Vierpunktbiegeversuche Querkraftversagen herbeigeführt werden konnte [1]. In drei Versuchsreihen in den Jahren 2013 bis 2016 konnten die Eignung des Systems anhand dieses Versuchsaufbaus nachgewiesen und Traglaststeigerungen gegenüber einem Referenzversuch ohne Querkraftbewehrung von bis zu 100 % erzielt werden. Im Zuge der Versuche wurden verschiedene Parameter, wie etwa verschiedene Schraubentypen, verschiedene Anordnungen der verklebte und unverklebte Installation sowie die Setztiefe der Schrauben untersucht. Zudem wurden drei Versuche mit zyklischen Lasten mit bis zu 5 Mio. Lastwechseln durchgeführt, wobei hier die Lasten zwischen 1/3 und 2/3 der statischen Bruchlast lagen. Auch hier konnte kein Versagen infolge der dynamischen Lasten erkannt werden, womit auch hier der Nachweis der Eignung des Systems für dynamisch belastete Bauteile ohne Einschränkung erbracht werden konnte. Der

Versuchsaufbau und die Versuchsergebnisse dieser Versuche sind detailliert in [1] beschrieben und in Abbildung 4 dargestellt.

Im Zuge des Zulassungsverfahrens wurden vom Gutachter zu den bereits durchgeführten 32 Versuchen der ersten drei Versuchsreihen weitere Versuche an Balken mit größerer Höhe und an Plattenstreifen gefordert. Daher wurden weitere Versuchsreihen durchgeführt, wobei die Balkenversuche wiederum an der Universität Innsbruck als Vierpunktbiegeversuch durchgeführt wurden. Hier wurden zwei Balkenhöhen von 32 cm und 44 cm untersucht, wobei der Schraubendurchmesser und die Setztiefe der Schrauben variiert wurden.



Abb. 4: Versuchsaufbau Querkraftverstärkung an der Universität Innsbruck [1]

Die Versuche an den Plattenstreifen konnten aufgrund der hohen erforderlichen Lasten (ca. 1500 kN Querkraft) nicht in der Versuchsanstalt der Universität Innsbruck durchgeführt werden. Diese 12 Versuche wurden daher im Labor der Universität der Bundeswehr in München durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei der Verwendung von Betonschrauben mit einem Nenndurchmesser von $d_0 = 22 \text{ mm}$ für diesen Versuchskörper Traglaststeigerungen von bis zu 150 % möglich sind. Werden die Betonschrauben mit etwas geringerer Einbindetiefe installiert, so nimmt die erzielbare Traglaststeigerung leicht ab. Ähnlich zeigt sich dies, wenn anstelle von Schrauben mit $d_0 = 22 \text{ mm}$ Schrauben mit einem Nenndurchmesser von $d_0 = 16 \text{ mm}$ in identischer Stückzahl eingesetzt werden [1].

Bei den Plattenversuchen wurden wiederum zwei Referenzversuche durchgeführt, die den Ausgangswert für die Traglaststeigerung darstellen. Auch hier konnte ein leichter Einfluss der Setztiefe der Schrauben auf die erzielbare Traglaststeigerung gezeigt werden. Dies gilt ebenso für Schrauben mit einem geringeren Durchmesser. Die Plattenversuche zeigen aber gute Übereinstimmung mit den durchgeführten Balkenversuchen, sodass eine Anwendung in platten- und balkenförmigen Stahlbetonbauteilen ohne Unterscheidung durchgeführt werden kann.

4 DAS BEMESSUNGSKONZEPT VON RELAST®

Auf Basis der durchgeführten Versuche sowie zahlreicher numerischer Simulationen war es möglich Bemessungsansätze für die Verstärkung mit RELAST® Verbundankerschrauben abzuleiten [1]. Um es dem verantwortlichen Ingenieur möglichst einfach zu machen, lehnen sich diese sehr stark an die DIN EN 1992-1-1 an. Basierend auf den Bemessungsansätzen und weiteren konstruktiven Regeln war es anschließend möglich, bauaufsichtliche Zulassung des DIBt für die Querkraftverstärkung (Z-15.1-344) und für die Durchstanzverstärkung (Z-15.1.345) zu erlangen.

4.1 Anwendungsbereiche

Die Würth Verbundankerschraube RELAST® kann als nachträgliche Querkraft- oder Durchstanzverstärkung in Stahl- und Spannbetonbauteilen aus Normalbeton der Festigkeitsklassen C20/25 bis C50/60 bei statischen und quasi-statischen sowie ermüdungsrelevanten Beanspruchungen eingesetzt werden. Dabei muss das zu verstärkende Bauteil eine Mindestbauteildicke von $h_{min} = 200mm$ aufweisen. Die maximale Bauteildicke der Durchstanzverstärkung liegt bei $h_{max} = 1100mm$ und die maximale Bauteildicke der Querkraftverstärkung bei $h_{max} = 2050mm$.

4.2 Querkraftverstärkung

Wie bereits erwähnt basieren die Gleichungen auf den Eurocode. Daher wird der Nachweis der Druck- und Zugstrebe in Übereinstimmung mit den Regelungen von DIN EN 1992-1-1 in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1/NA für $\alpha = 90^\circ$ und $\theta = 45^\circ$ mit folgenden Gleichungen ermittelt:

$$V_{Rd,max} = \frac{1}{2} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu_1 \cdot f_{cd}$$

$$V_{Rd,s} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{ywd,ef}$$

Die Versuche zeigten, dass die volle plastische Tragfähigkeit der Zugstrebe nicht erreicht werden kann, also die Schraubenverankerung versagt, bevor es zum Fließen der Schraube kommt. Dies wird durch die Definition einer sogenannten ausnutzbaren Spannung berücksichtigt, welche mit Hilfe der folgenden Formel berechnet wird:

$$f_{ywd,ef} = c_1 \cdot \frac{f_{ywk}}{\gamma_s} + c_2 \cdot \frac{1}{\rho_{sw,gew1}} \cdot \nu_1 \cdot f_{cd} \leq \frac{f_{ywk}}{\gamma_s}$$

Die Parameter c_1 und c_2 wurden durch statistische Auswertungen der Versuchsergebnisse abgeleitet und berücksichtigen den Schraubendurchmesser sowie die Setztiefe der Schrauben, vgl. Abb. 5

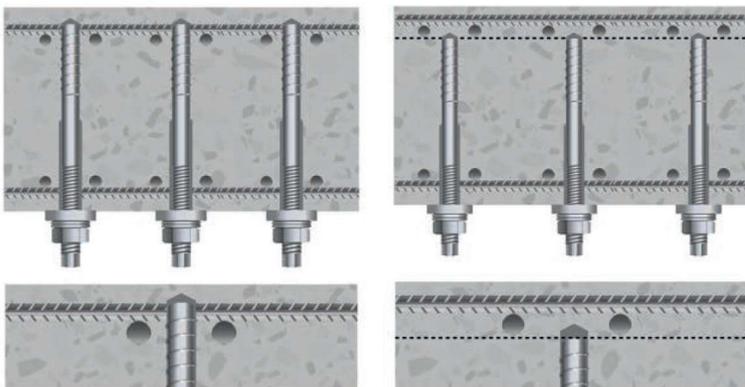


Abb. 5: Setztiefen der RELAST® Verbundankerschrauben

4.3 Durchstanzverstärkung

Wie die Querkraftverstärkung beruht auch die Durchstanzverstärkung mit RELAST® Verbundankerschrauben auf den bekannten Gleichungen des EC 2. Der Durchstanzwiderstand mit Durchstanzbewehrung wird mit folgender Gleichung ermittelt:

$$V_{Rd,cs} = 0,75 \cdot V_{Rd,c} + 1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd,ef}}{u_1 \cdot d}$$

Die Tragfähigkeit kann mit Hilfe von RELAST® um 40% ($k_{max} = 1,4$) gesteigert werden und entspricht dem EC 2 für konventionelle Bügelbewehrung [1].

Die effektive Spannung $f_{ywd,ef}$ wird abweichend vom EC 2 wie folgt berechnet:

$$f_{ywd,ef} = 5,5 \cdot \frac{k_{max}}{\gamma_s} \cdot \frac{d}{d_{K,1}} \leq 0,5 \cdot f_{ywd}$$

Für die Ermittlung dieses Wertes wurden die Versuchsergebnisse wiederum statistisch ausgewertet. Der Faktor $d_{K,1}$ stellt dabei den Durchmesser der gewählten Schraube im Bereich des Betonschneidengewindes dar.

5 AUSGEWÄHLTE PROJEKTE

5.1 Durchstanzverstärkung der Brücke über den Werbellinkanal

Bei der Nachrechnung der Brücke wurden Defizite der Tragfähigkeit festgestellt, da die vorhandene Durchstanzbewehrung den erhöhten Anforderungen aktueller Normen nicht gerecht wird. Zu nachträglichen Durchstanzverstärkung wurden insgesamt 230 RELAST® Verbundankerschrauben eingebaut. Die Montage der Schrauben wurde in kürzester Zeit mit Hilfe eines Brückeninspektionsfahrzeugs unterhalb der Brücke (Abb. 6) unter laufendem Verkehr auf der Brücke vorgenommen. Hierdurch ließen sich umfangreiche Umfahrungsstrecken effektiv vermeiden, welche sich in diesem Fall sowohl auf den Individualverkehr als auch auf den ÖPNV ausgewirkt hätten. Die nachträgliche Verstärkung mit RELAST® schaffte zusätzlich eine Redundanz im Falle eines Schiffsanpralls und die Brücke konnte als Umleitungsbauwerk für anstehende Baumaßnahmen vorbereitet werden.



Abb.6: Verstärkung der Brücke unter laufendem Verkehr

5.2 Querkraftverstärkung einer Autobahnbrücke bei Lindau (A96, Amerikaweg)

Bei der Nachrechnung der Brücke stellte man eine unzureichende Querkraftbewehrung fest. Damit die Brücke den aktuellen und deutlich restriktiveren Normen gerecht wird, hat man diese entsprechend bemessen und unter laufendem Verkehr mit RELAST® Verbundankerschrauben verstärkt. Hierzu wurden 160 Schrauben mit einem Durchmesser von 22mm wiederum von unten installiert. Vier verschiedene Längen stellten sicher, dass der geplante Einbauzustand exakt erzielt wurde und der Überstand der Schrauben im Lichtraumprofil unterhalb der Brücke so gering wie möglich ausfällt. Während der Dauer der Verstärkungsarbeiten war der Verkehr der untergeordneten Straße unter der Brücke mit Hilfe einer Ampelschaltung geregelt (vgl. Abb. 7). Der Verkehr auf der Oberseite der Brücke (Autobahn A96) konnte ohne Einschränkungen aufrechterhalten werden. Die komplette Sanierungsmaßnahme hat lediglich vier Tage in Anspruch genommen.



Abb.7: Querkraftverstärkung unter laufendem Verkehr

5.3 Querkraftverstärkung einer Brücke in Bad Reichenhall

Die Brücke in Bad Reichenhall über die Deutsche Bahn und die Frühlingsstraße wurde 70 Jahr nach der Errichtung umfangreich saniert. Unter anderem wurde eine nachträgliche Querkraftverstärkung mit RELAST® Verbundankerschrauben durchgeführt. In der ursprünglichen Statik der Brücke wurde der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit über die Hauptspannungen geführt, hierdurch wurde die Brücke damals fast ohne Querkraftbewehrung hergestellt. Aufgrund dieses Defizits wurden nachträglich 1.224 RELAST® Verbundankerschrauben mit einem Durchmesser von 22mm eingebaut. Hierfür wurden Anker in der Standardlänge 1000mm verwendet, die nach dem Einbau bis zur geplanten Einbindetiefe auf der Baustelle gekürzt wurden. Der Korrosionsschutz wurde anschließend mit Hilfe einer Hutmutter wiederhergestellt. Die Verstärkung der Brücke erfolgte innerhalb von 20 Arbeitstagen unter laufendem Verkehr. Dadurch wurden Umfahrestrecken vermieden und CO₂-Emissionen aufgrund von zusätzlichen Wegstrecken eingespart. Der Einfluss der Verstärkungsmaßnahme auf den Individualverkehr als auch auf den ÖPNV (auf und unterhalb der Brücke) war vernachlässigbar klein (Abb. 8).



Abb.8: Querkraftverstärkung unter laufendem Verkehr

5.4 Querkraftverstärkung einer denkmalgeschützten Sporthalle in München

Die Turnhalle ist Bestandteil eines 1908 errichteten Gebäudes, welches im 2. Weltkrieg stark beschädigt und 1950 vollständig wiederhergestellt wurde. Gegenstand der Sanierungsmaßnahme war u.a. eine Ertüchtigung der auf drei Seiten umlaufenden Galerie. Die Stahlbeton-Tragkonstruktion der Galerie wird aus Kragbalken gebildet, die in die Stützenvorlagen der Umfassungswände einbinden sowie aus Querträgern, auf denen die Deckenplatte auflagert. Wie zum Zeitpunkt der Erstellung üblich wurde bei den Balken nur eine geringe Bügelbewehrung verwendet, da damals Aufbiegungen der Längsbewehrung aus der unteren in die obere Lage einen Großteil der Schubkraftübertragung abdeckten. Im vorliegenden Fall zeigte sich allerdings, dass keine Aufbiegungen vorhanden waren. Zudem lag nach den Abtragsarbeiten bei mehreren Kragbalken die Bügelbewehrung frei und war somit wirkungslos (siehe Abb. 9). Da das Bauwerk unter Denkmalschutz steht, durfte die Verstärkungsmaßnahme nicht sichtbar sein. Daher wurden insgesamt 113 RELAST® Verbundankerschrauben mit einem Durchmesser von 16mm in unterschiedlichen Längen zur Verstärkung von oben in das Bauwerk installiert. Der Überstand der Schrauben wurde anschließend vom Fußboden überdeckt.



Abb.9: Freigelegte Bewehrung der Kragarme

6 FAZIT

Seit Oktober 2019 sind die RELAST® Verbundankerschrauben als nachträgliche Querkraft- und Durchstanzbewehrung durch das Deutsche Institut für Bautechnik zugelassen. Dem gingen jahrelange wissenschaftliche Untersuchungen und zahlreiche Bauteilversuche an der Universität Innsbruck voraus. Diese Versuche zeigten, dass mit Hilfe der nachträglich eingebauten Betonschrauben die Traglasten gegenüber Referenzversuchen ohne Schubbewehrung um bis zu 100 % im Falle der Querkraftverstärkung und um bis zu 40 % im Falle der Durchstanzverstärkung gesteigert werden können. Auf Basis der Versuchsergebnisse wurden anschließend Bemessungskonzepte abgeleitet, die auf den Bemessungsmodellen des Eurocode 2 und somit auf der aktuellen Normung basieren [1]. Diese Bemessungskonzepte, die nun auch in den Zulassungen enthalten sind, ermöglichen dem planenden Ingenieur eine einfache Dimensionierung der Verstärkung mithilfe der bekannten Gleichungen der Normung.

Wie zahlreiche durchgeführte Projekte zeigen, liegt der große Vorteil der nachträglichen Verstärkung mit RELAST® Verbundankerschrauben in der einfachen Installation und sofortigen Belastbarkeit der Schrauben. Das Verstärkungssystem kann von einer Seite in die zu verstärkende Struktur eingebaut werden. Damit entfällt der Abtrag von Fußboden- oder Fahrbahnaufbauten auf der Oberseite des Tragwerks, welcher bei anderen Verstärkungssystemen oftmals notwendig ist. Außerdem kann die Verstärkung unter laufendem Betrieb durchgeführt werden. Gleichzeitig ist es durch die hohe Tragwirkung der RELAST® Schrauben möglich, bei geringer Störung des Bauwerks eine hohe Traglaststeigerung zu erzielen. Durch ein vorheriges Detektieren der vorhandenen Bewehrung mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren ist es zudem möglich, die Beschädigung vorhandener Bewehrung zu vermeiden.

- [1] Feix, Lechner (2020). „Das neue Bauaufsichtlich zugelassene System RELAST zur nachträglichen Bauwerksverstärkung; Von der Grundidee über wissenschaftliche Forschung zur Zulassung“, In: pl²/8 Das Planermagazin für Ingenieure, Architekten und Planer, Nr. 19, Jahrgang 14, März 2020