

Geklebte Lamellenbewehrungen haben Langzeittest bestanden: nach 32 Jahren unter 87% der mittleren Bruchlast zeigt die Epoxidharz-Verklebung keine Schwächen

Autor(en): **Egger, Gottfried**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Tec21**

Band (Jahr): **129 (2003)**

Heft 5: **Behindertengerechtes Bauen**

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-108715>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Geklebte Lamellenbewehrungen haben Langzeittest bestanden

Nach 32 Jahren unter 87 % der mittleren Bruchlast zeigt die Epoxidharz-Verklebung keine Schwächen

Im März 1970 wurde an der Empa Dübendorf ein Stahlbetonträger mit geklebter Stahllamellen-Bewehrung unter eine Last von 87 % der Bruchlast gesetzt. Diese wurde bis heute beibehalten, doch der permanent überwachte Träger zeigt sich auch nach 32 Jahren unbeeindruckt. Aus dem Kriechverhalten von Stahl und Beton folgt, dass in der Klebfuge praktisch keine Verschiebungen stattgefunden haben. Ergänzende statische Bruchversuche und dynamische Ermüdungsbeanspruchungen bestätigen die erstaunliche Leistungsfähigkeit der «historischen» Epoxidharz-Verklebung.

Ende der Sechzigerjahre traten in einem neuen Industriebau an diversen Sheddach-Fertigelementen ungewöhnliche Rissbildungen im Stützbereich bei der Fensterzone infolge lokal ungenügender Bewehrung auf. Zur Behebung des Schadens wurden die fehlbaren Zuggurte durch Aufkleben von dünnen Lamellen aus Stahl äusserlich verstärkt. Diese Technik war damals in Ansätzen bekannt, Erfahrungen aus Langzeitversuchen fehlten aber weitgehend. In Zusammenarbeit mit der damaligen Abteilung Massivbau der Empa wurde deshalb ein Prüfprogramm abgesteckt, das statische Belastungsproben bis zum Bruch, einen dynamischen Ermüdungsversuch und die noch heute aktuellen Langzeituntersuchungen umfasste. Als Prüfkörper wählte man der Kosten und der Einfachheit halber nur den relevanten Abschnitt der vorfabrizierten Originalbauteile.

Der Langzeitversuch sollte bei einer dafür etwas überdimensionierten Belastung eigentlich nur wenige Monate dauern. Daraus sind schliesslich 32 Jahre geworden, und der betreffende Prüfstand wird für die Empa je länger, je prestigeträchtiger. Vor ca. 16 Jahren wurden die Betonquader zur Lastaufbringung auf den Versuchsträger durch eine gleichwertige, über zwei hakenförmige Stahllaschen angehängte Bleilast ersetzt (Bild 1).

Die Prüfkörper

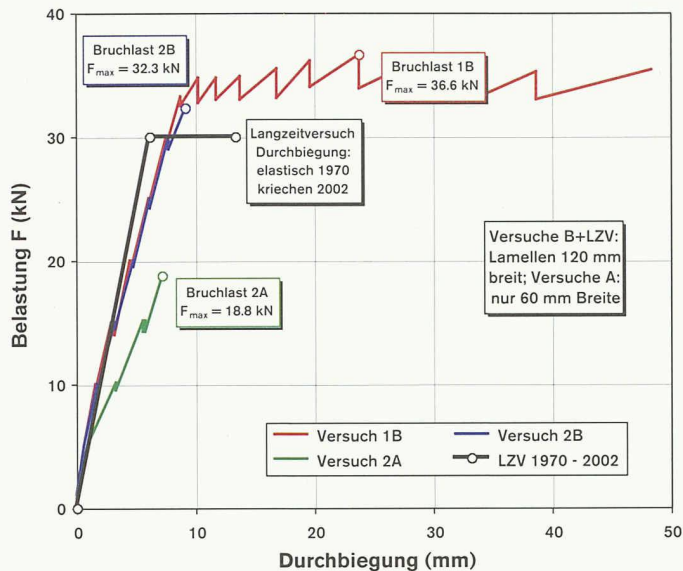
Für die statischen und die dynamischen Belastungsversuche wurden dieselben vorfabrizierten Prüfkörper mit den folgenden Materialkennwerten eingesetzt:

- Würfeldruckfestigkeit des Betons aktuell bestimmt mittels Betonhammer: $f_{cw,ak} = 58 \text{ N/mm}^2$
- Würfeldruckfestigkeit des Betons zurückgerechnet auf 28 Tage: $f_{cw,28} = 28 \text{ N/mm}^2$
- Stahlqualität der Lamellen nach Norm SIA 161 (1990) bestimmt aus Bruchversuch: Fe E 235
- Beim Kleber handelt es sich um einen Zweikomponenten-Epoxidharzkleber der Sikadur-Familie der Firma Sika AG. Die mechanischen Eigenschaften und die hohe Wärmebeständigkeit garantieren einen dauerhaften Verbund. Seit 1960 werden diese Produkte als Brückenkleber eingesetzt und ab Ende der 60er-Jahre auch als Kleber für Bewehrungen mit Stahllaschen verwendet. Das Klebstoffsystem «Sikadur-30» mit angepasstem Primer ist in Deutschland für schubfeste Klebeverbindungen zwischen Stahllamellen und Betonteilen zugelassen und wird allgemein für Tragwerksverstärkungen, insbesondere auch für CFK-Lamellen, eingesetzt. Es weist folgende Festigkeiten auf: statischer E-Modul $12\,800 \text{ N/mm}^2$; Haftzugfestigkeit auf Stahl 33 N/mm^2 ; Druckfestigkeit 95 N/mm^2 . Möglicherweise weisen die Träger eine zu knappe Bügelbewehrung im Auflagerbereich auf (zu grosse Abstände), was bei den statischen Belastungsversuchen zu vorwiegend spröden Brüchen geführt hat.

1

Aktueller Versuchsstand (April 2002) mit modernisierter Lastaufbringung. Die angehängte Bleilast beträgt rund 87 % der nachgewiesenen mittleren Bruchlast





2

Last-Verformungs-Diagramm von statischen Belastungsversuchen unter Einbezug der Ergebnisse des Langzeitversuchs (LZV) der Jahre 1970 bis 2002 (effektive Trägerbelastung immer 2 F)

Statische Belastungsversuche

Als erste Massnahme zur Gewährleistung der vorgesehenen Sanierung wurden im Februar 1970 von der Empa sechs Stahlbetonbalken mit nachträglich aufgeklebter und unterschiedlich breiter Stahllamelle statisch bis zum Bruch belastet. Ziel der Untersuchungen war, das Verhalten dieser äusseren Bewehrungsart abzuklären. Insbesondere sollten die maximal erreichbare Bruchlast, die Art des Bruches und das Haftvermögen zwischen Stahlblech und Beton untersucht werden. Dazu wurden die Versuchskörper als einfache Balken gelagert und durch 2 Einzellasten in den ungefähren Drittelpunkten der Spannweite stufenweise mit Ableseung der Durchbiegungen in Feldmitte höher beansprucht. Bei insgesamt fünf der sechs untersuchten Träger lag die Bruchursache beim plötzlichen Versagen des Verbundes zwischen Lamelle und Beton (spröder Bruch im Auflagerbereich). Nur an einem Träger erfolgte ein Biegebruch mit dem üblicherweise erwünschten Stahlfließen mit Betonstauchung im mittleren Biegebereich. Dies ist wahrscheinlich auf die knappe (oder mit zu grossen Abständen versetzte) Schubbewehrung in Auflagnähe zurückzuführen. Bei der Rissausbildung in diesem Bereich konnte sich so frühzeitig ein vertikaler Versatz im Beton ausbilden, der in der Folge zum überraschenden Abschälen der Lamelle führte.

Im Mittel der Versuche mit 60 mm breiter Lamelle ergibt sich eine Bruchlast von $F_{U60} = 17,8 \text{ kN}$ (Bild 2). Dies ist fast genau die Hälfte der mittleren Bruchlast von $F_{U120} = 34,5 \text{ kN}$ bei der doppelten Lamellenbreite. Nach Angaben des ehemaligen Auftraggebers beträgt die rechnerische Nutzlast $F_N = 10 \text{ kN}$. Damit beläuft sich der Sicherheitsfaktor der Versuchsbalken auf unge-

fähr $f_s = F_{U120} / F_N = 3.45$, was angesichts des spröden Bruchverhaltens und der damals neuen Technik etwa als angemessen erscheint.

Beim Langzeitversuch beträgt die wirksame Beanspruchung $F_{LZV} = 30,0 \text{ kN}$. Das Verhältnis der Dauerlast zur mittleren Kurzzeit-Bruchlast von $F_{U120} = 34,5 \text{ kN}$ erreicht damit einen erstaunlich hohen Wert von 87,0%. Die Gesamtverformung über einen Zeitraum von fast 32 Jahren beläuft sich wiederum auf $\delta_{LZV} = 13,38 \text{ mm}$; dies ist das 2,2fache der anfänglich elastischen Verformung von $\delta_A = 6,19 \text{ mm}$.

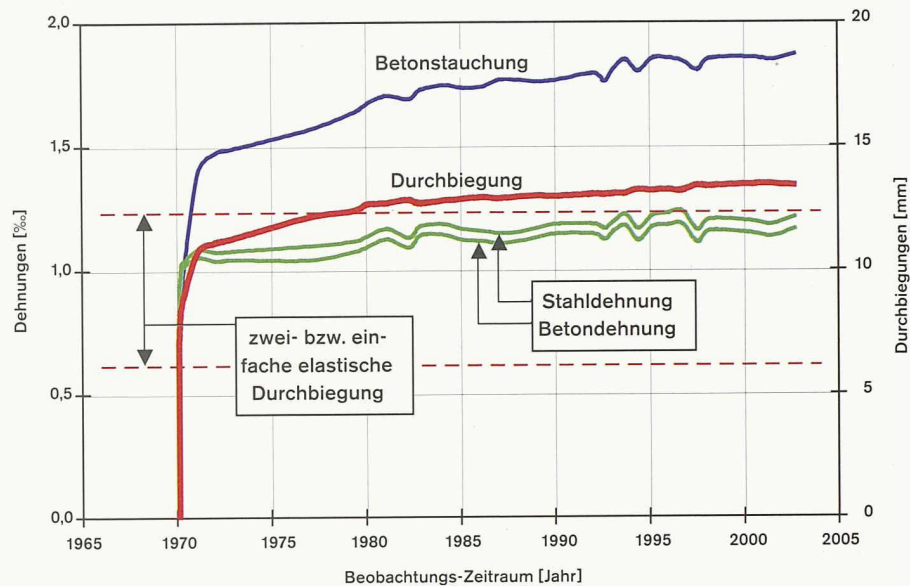
Dynamischer Belastungsversuch

Zur Überprüfung des Ermüdungsverhaltens wurde im Biegeversuch mit zyklischer Belastung wie bei den statischen Bruchbelastungen ein Träger mit einer 120 mm breiten aufgeklebten Lamelle eingesetzt. In drei Phasen erfolgte das Aufbringen von jeweils zwei Millionen Lastwechseln bei einer Frequenz von 4.0 Hz. Die dynamischen Lasten bewegten sich zwischen $F = 5,0$ und $10,0 \text{ kN}$ in der Phase 1, dann zwischen $10,0$ und $20,0 \text{ kN}$ (Phase 2) und zwischen $13,5$ und $27,0 \text{ kN}$ (Phase 3). Vor und nach jeder Phase wurde eine statische Belastung mit Ableseung der Mitteldurchbiegungen eingeschaltet. Die sechs Millionen Lastwechsel führten zwar zu bleibenden Verformungen, aber eine wesentliche Abnahme der Balkensteifigkeit scheint nicht eingetreten zu sein. Erstaunlich ist auch, dass die Kriechverformungen der Jahre 1970 bis 2002 bei einer Dauerlast von $F = 30 \text{ kN}$ rund dreimal grösser ausgefallen sind als die plastischen Verformungen bei derselben Belastung nach der doch enormen Ermüdungsbeanspruchung. Die maximale Oberlast bei den Schwingungsversuchen erreichte mit $F = 27,0 \text{ kN}$ immerhin gegen 80% der mittleren Bruchlast in den statischen Belastungsversuchen.

Langzeitversuch

Am 24. März 1970 wurde der Langzeitversuch in der Bauhalle der Empa gestartet. Trotz den recht erfolgreichen statischen und dynamischen Belastungsversuchen wollte man das Balkenverhalten noch unter ständig einwirkenden Lasten untersuchen. Man befürchtete damals, dass sich die Verstärkungswirkung der aufgeklebten Stahlbleche durch das Kriechen in der Klebfuge über die Zeit abbauen könnte. Die Dauerbeanspruchung wurde mit $2 F = 2 \times 30 \text{ kN}$ deshalb sehr hoch angesetzt. Das Verhältnis Versuchslast zu mittlerer Trägerbruchlast betrug ganze 87%. So sollte ein aussagekräftiges Ergebnis in wenigen Monaten erwirkt werden. Um das Verformungsgeschehen von Stahl und Beton im Detail mitverfolgen zu können, wurden nebst der Durchbiegung auch sechs Beton- und Lamellen-Dehnungen im Mittelbereich des Trägers beobachtet. Bild 1 vermittelt einen Eindruck der Versuchsanordnung. Die Verformungsergebnisse sind im Bild 3 grafisch dargestellt und können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei der hohen Belastung von rund $2 F = 2 \times 30 \text{ kN}$ ergibt sich eine Zunahme der Trägerdurchbiegung von elastisch $6,2 \text{ mm}$ zufolge Kriechens auf total $13,4 \text{ mm}$. Die anfänglich elastische Einsenkung am 24.03.1970 hat sich demnach in der Zeit bis zum 16.10.2002 um



3

**Zeit-Verformungs-Diagramm des Langzeitversuchs
1970 bis 2002 (Belastung $2 F = 2 \times 30 \text{ kN}$)**

einen Faktor von $f = 2.2$ erhöht, was als «moderat» eingestuft werden kann.

– Die Betonstauchung auf der Trägeroberseite ist innerhalb von 32 Jahren um einen Faktor von $f = 3.1$ gewachsen. Im Gegenzug dazu zeigen die Beton- und Stahl-Zugdehnungen wiederum einen eher unterdurchschnittlichen Zuwachs von ca. 1,3-mal die elastischen Anfangsdehnungen.

– Die Dehnungen von Beton und Stahl auf der Trägerunterseite sind sichtlich im Gleichtakt auf 132 bzw. 134 % am 16.10.2002 gewachsen. Dies besagt, dass in der Klebfuge selbst praktisch keine differentiellen Verschiebungen stattgefunden haben, ein wirklich erstaunliches und ausgesprochen bedeutsames Ergebnis.

– Die Zunahme der Durchbiegungen betrug im ersten Jahr 72 %, in weiteren neun Jahren ergaben sich zusätzliche 31 %, und nach wiederum 20 Jahren resultierte schliesslich noch ein Zuwachs von 13 % (aufsummiert in 30 Jahren total 116 %). In den letzten vier Jahren des laufenden Versuches liess sich praktisch keine Verformungszunahme mehr feststellen.

Der Langzeitversuch war immer in einem der Witterung entzogenen, nicht klimatisierten Raum platziert. Entsprechend ergaben sich Temperaturschwankungen zwischen ca. 16 und 24 °C sowie relative Luftfeuchten im Bereich von ca. 30 bis 70 %, was zeitweise zu gewissen Messwert-Streuungen geführt hat.

Ausblick

Als sehr beruhigend ist die Tatsache zu werten, dass Verklebungen Stahl auf Beton nach millionenfacher Schwingungsbeanspruchung und einer wirklich anforderungsreichen Langzeitbelastung keine offensichtli-

chen Schwächen zeigen; dies gilt sogar bei Lasteinwirkungen von 80 bzw. 87 % der nachgewiesenen mittleren Bruchkraft.

Aufbauend auf den ersten Klebeversuchen an der Empa vor über dreissig Jahren werden in der Praxis allgemein Sanierungs- und Umbauprobleme auf diese Weise gelöst. In zunehmendem Ausmass gelangen CFK-Lamellen für Biege- und Schubverstärkungen zum Einsatz. Auf diesen Gebieten hat sich die Empa seit geraumer Zeit in diversen Forschungsprojekten stark engagiert. Mit Bestimmtheit soll auch der beschriebene Langzeitversuch weitergeführt werden.

Der Vollständigkeit halber ist zu bemerken, dass sich die Tragwirkung von ungeschützten Verklebungen im Brandfall sehr schnell ändern kann. Schwere Stahllamellen müssen deshalb gegen das Herunterfallen unter Hitzeeinwirkung gesichert sein, und derart verstärkte Konstruktionen sollten immer eine minimale Restsicherheit bei Ausfall der Verklebungen aufweisen.

Gottfried Egger, dipl. Bauing. ETH, Empa, Abteilung Ingenieur-Strukturen, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf. gottfried.egger@empa.ch

Literatur

- G. Egger: Stahlbetonträger mit geklebter Lamellen-Bewehrung. Empa Dübendorf, Prüfbericht Nr. 840 684, 2002.
M. Ladner, Ch. Weder: Geklebte Bewehrung im Stahlbetonbau. Empa Dübendorf, Bericht Nr. 206, 1981.