Versuche über Schub bei Querbiegung

Working Paper**Author(s):**

Kaufmann, Josef; Menn, Christian

Publication date:

1976

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000099541>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

Bericht / Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich 7201(1)

Versuche über Schub bei Querbiegung

Josef Kaufmann
Christian Menn

Dezember 1976
Bericht Nr. 7201-1

Versuche über Schub bei Querbiegung

von

**Josef Kaufmann, dipl. Ing.
Prof. Dr. Christian Menn**

**Institut für Baustatik und Konstruktion
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich**

**Zürich
Dezember 1976**

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Versuchsprogramm	1
2. Versuchsträger	3
2.1 Beschreibung	3
2.1.1 Abmessungen der Versuchsträger und Lastanordnung	3
2.1.2 Bewehrung	3
2.1.3 Herstellung	3
2.2 Baustoffe	4
2.2.1 Bewehrungsstahl	4
2.2.2 Beton	4
2.3 Rechnerische Werte	4
2.3.1 Schubbruchlast	4
2.3.2 Querbiegebruchlast	5
2.3.3 Gebrauchslasten	5
3. Versuchsdurchführung	6
3.1 Versuchsanlage	6
3.1.1 Belastung für Längsbeanspruchung	6
3.1.2 Belastung für Querbeanspruchung	6
3.1.3 Lagerung	6
3.1.4 Messeinrichtungen	6
3.2 Versuchsablauf	7
4. Ergebnisse	8
4.1 Tragverhalten im Gebrauchs- und Bruchzustand	8
4.2 Beanspruchung der Bewehrung	9
4.2.1 Belastungs-Dehnungs-Diagramme	9
4.2.2 Beanspruchung der Bewehrung im Gebrauchszustand	10
4.2.3 Bruch infolge Querbiegung	11
4.3 Beanspruchung des Betons	11
4.3.1 Druckflansch	11
4.3.2 Betondruckdiagonalen im Steg	11
4.4 Verformungen	12
4.4.1 Schiebungen	12
4.4.2 Durchbiegungen	12

	Seite
4.5 Rissverhalten	12
4.5.1 Risseverlauf	12
4.5.2 Rissweiten	13
4.6 Vergleich zwischen Norm und Versuchen	13
4.6.1 Vergleich der experimentellen Bruchlast mit der duktilen Schubtragfähigkeit bei reiner Längsbeanspruchung	13
4.6.2 Vergleich der experimentellen Bruchlast mit der Schubtrag- fähigkeit überarmerter Querschnitte (obere Schubspannungs- grenze bei reiner Längsbeanspruchung)	13
5. Schlussfolgerungen	15
5.1 Dimensionierung der Bewehrung	15
5.2 Betonabmessungen	15
ZUSAMMENFASSUNG	16
RESUME	17
SUMMARY	18
VERDANKUNGEN	19
LITERATURVERZEICHNIS	20
BEZEICHNUNGEN	21
TABELLEN 1 BIS 8	24
BILDER 1 BIS 91	30

1. EINLEITUNG

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Eine wirklichkeitsnahe Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit lässt sich nur unter Berücksichtigung aller gleichzeitig wirkenden Schnittkräfte durchführen. Für beliebige Kombinationen von Biegung, Normalkraft, Querkraft und Torsion liegen heute zuverlässige Forschungsergebnisse vor; insbesondere befassen sich neuere Arbeiten sehr eingehend mit der Bestimmung der Schubtragfähigkeit bei gleichzeitiger Wirkung sämtlicher Stabschnittkräfte. Der Einfluss einer zusätzlich überlagerten Querbiegung ist dagegen bisher weder theoretisch noch experimentell zufriedenstellend abgeklärt worden.

Vor allem im Brückenbau spielt die Beanspruchungskombination "Schub in Längsrichtung mit überlagerter Querbiegung" eine wichtige Rolle, da die schubbeanspruchten Hauptträgerstege durch das Zusammenwirken mit der Fahrbahnplatte praktisch immer eine mehr oder weniger grosse Querbiegung aufnehmen müssen. Hier stellen sich nun zwei für die Querschnittsbemessung wichtige Fragen:

1. Muss die vertikale Stegbewehrung für Schub und Querbiegung getrennt bemessen werden?
2. Muss die zur Bestimmung der Stegstärke massgebende Schubspannungsgrenze bei dieser Beanspruchungskombination abgemindert werden?

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit bestand darin, diese beiden wichtigen Fragen in umfangreichen experimentellen Untersuchungen zu prüfen und Grundlagen für eine theoretische Modellbildung zu erarbeiten.

1.2 Versuchsprogramm

Das experimentelle Forschungsprogramm über das Schubtragverhalten bei Querbiegung ist in Tabelle 1 zusammengestellt. Es umfasst die Prüfung von sechs I-förmigen Stahlbetonbalken mit je zwei Bruchversuchen pro Träger. Die schubbeanspruchten Bereiche der Versuchsbalken wiesen eine stark unterschiedliche Stegbewehrung auf, so dass in der Laststellung I das duktile Bruchverhalten, und in der Laststellung II das Sprödbbruchverhalten geprüft werden konnte. Beim duktilen Verhalten in Laststellung I liess sich somit die Frage der Überlagerung der Bewehrungsquerschnitte infolge Schub und Querbiegung abklären, während beim Sprödbbruchverhalten in Laststellung II der Einfluss der Querbiegung auf die Schubspannungsgrenze geprüft werden konnte.

Bei den Trägern S_1 bis S_5 wurde in den beiden Laststellungen I und II der Bruch bei konstanter Querbiegung (m_{zul}) durch Steigerung der Querkraft erreicht. Die Prüfung des Trägers S_6 erfolgte in Laststellung I in gleicher Weise. In Laststellung II hingegen führte die Steigerung der Querbiegung bei konstanter Querkraft (Q_{zul}) zum Bruch des Trägers.

Parameter der Versuchsserie waren einerseits die Schubkennwerte

- Bügelbewehrung
- Längsbewehrung
- Diagonalenneigung

und andererseits die Querbiegekennwerte

- Verhältnis der Bügelbewehrung auf der Zug- und der Druckseite
- Grösse der Querbiegebeanspruchung.

Ausgehend vom Vergleichsträger S_1 variierte bei den übrigen Versuchen jeweils nur ein Parameter, so dass sich das durch die Querbiegung veränderte Schubtragverhalten sofort feststellen liess.

2. VERSUCHSTRÄGER

2.1 Beschreibung

2.1.1 Abmessungen der Versuchsträger und Lastanordnung

Die Trägerabmessungen und die Anordnung der Belastungen für die Längs- und Querbeanspruchung sind aus den Bildern 1, 2 und 3 ersichtlich. Die Träger wiesen im Lastfall I eine Spannweite von 6.0 m und im Lastfall II eine verkürzte Spannweite von 4.0 m auf. Der I-förmige Trägerquerschnitt war 62 cm hoch, die Flansche 70 cm breit. Die Stegstärke betrug 10 cm. Damit liess sich bei einer möglichst hohen Beanspruchung des Betonquerschnittes die zweischnittige Bügelbewehrung gerade noch einwandfrei anordnen.

Die Flansche waren beim Steganschluss 9 cm stark und verjüngten sich bis zum Flanschrand auf 7 cm.

Die Belastung für die Beanspruchung in Längsrichtung erfolgte mit zwei 100 t Pressen, die in Laststellung I in einem Abstand von 2 m symmetrisch zur Trägermitte angeordnet waren. In Laststellung II wurde das Auflager im geprüften Bereich umgesetzt, die Spannweite dadurch auf 4.0 m verkürzt und nur noch eine Hauptlast-Pressen eingesetzt.

Die Belastung für die Querbiegung wurde durch sechs Sekundärpressen über Hebelarme und Verteilbalken punktförmig in Abständen von 55 cm längs des ganzen Trägers auf die Flanschränder übertragen.

2.1.2 Bewehrung

Die Bewehrung der Versuchsträger ist in den Bildern 8 bis 10 dargestellt; sie bestand bei allen Balken aus naturhartem, profiliertem Stahl (Box-Ultra). Die Betonüberdeckung der Querbewehrung betrug 1 cm, diejenige der Längsbewehrung 2 cm.

Die Bügelbewehrung liess sich bei der geringen Stegstärke und der unterschiedlichen Querschnittsfläche auf der Zug- und Druckseite nicht geschlossen ausbilden. Im Hinblick auf eine einwandfreie Einleitung der Querbiegung wurden die Bügel bis zum Rand der Flansche verlängert.

Die Abstufung der Längsbewehrung entsprach dem Verlauf der Zugkraft im Untergurt. Zur Elimination von Unsicherheiten in der Kraftübertragung bei üblichen Armierungsstössen wurden die einzelnen Bewehrungsstäbe, welche unterschiedliche Durchmesser aufwiesen, stumpf zusammengeschweisst. Damit sich der Bruch gut lokalisieren liess, wurden die Auflagerbereiche und die Zonen ausserhalb der Prüfstellen überdimensioniert.

2.1.3 Herstellung

Die Schalung der Versuchsträger bestand aus einer massiven Holzkonstruktion. Distanzhalter und eine kräftige Vorspannung gewährleisteten eine einwandfreie Lage der Bewehrung und eine massgerechte Herstellung der Träger.

Die Träger wurden liegend betoniert. Zur Verdichtung des Betons im dünnen, stark bewehrten Querschnitt dienten sechs Schalungsvibratoren. Dank sorgfältigem Einbringen und Verdichten liess sich auch im unteren, vollständig eingeschalteten Flansch ein einwandfreier Beton mit ausreichender Festigkeit herstellen. Bis zur Versuchsdurchfüh-

rung wurden die Träger bei einer konstanten Temperatur von 20°C während 28 Tagen gelagert.

2.2 Baustoffe

2.2.1 Bewehrungsstahl

In Tabelle 2 sind die Festigkeitswerte des verwendeten Bewehrungsstahles zusammengefasst. Die Streuungen bei Stählen mit gleichem Durchmesser waren klein, die Mittelwerte somit repräsentativ. In Bild 11 ist ein typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufgezeichnet. Da die Kurzzeit-Festigkeitswerte bei verschiedenen Dehnungsgeschwindigkeiten $\dot{\epsilon}$ stark variieren, wurden der Auswertung die sogenannten statischen Werte ($\dot{\epsilon} = 0$) zugrunde gelegt. Diese Werte ergaben sich aus den in [2] beschriebenen Zugversuchen.

2.2.2 Beton

Die Zusammensetzung des mit schweizerischem Portlandzement hergestellten Betons war bei allen Versuchsträgern dieselbe (Tabelle 3). Die Sieblinie entsprach dabei der EMPA-Kurve.

Zur Ermittlung der Betonfestigkeit wurden mit jedem Balken gleichzeitig sechs Prismen (12 x 12 x 36 cm) hergestellt und zum Zeitpunkt des Versuches jeweils an einem Prisma der Elastizitätsmodul und die Prismendruckfestigkeit, an den übrigen Probekörpern die Biegezug- und Würfeldruckfestigkeit ermittelt. Diese bei relativ hoher Dehnungsgeschwindigkeit gemessenen Werte sind aus Tabelle 4 zu entnehmen.

2.3 Rechnerische Werte

Die folgenden Angaben über die rechnerischen Werte zur Bestimmung der theoretischen Bruchlasten und der Gebrauchslasten beziehen sich auf den eigentlichen Prüfbereich. Auflager- und Zwischenzonen waren stärker bemessen. Die theoretischen Werte wurden für reine Längsbeanspruchung, bzw. reine Querbeanspruchung, d.h. ohne Interaktion, ermittelt.

Die Bewehrungsquerschnitte sind in den Bildern 8 bis 10 angegeben. Der in Tabelle 1 aufgeführte rechnerische Bewehrungsgehalt der Bügel wurde wie folgt festgelegt:

$$\mu_B(\%) = \frac{F_{eB}}{b_o \cdot s_B} \cdot 100\%$$

2.3.1 Schubbruchlast

Die Berechnung der theoretischen Traglast bei reiner Längsbeanspruchung erfolgte nach Norm SIA 162, Richtlinie 34. In Anbetracht der relativ hohen nominellen Schubbeanspruchung der Balken, wurde der Schubwiderstandsanteil Q_b nicht berücksichtigt. Mit der Diagonalenneigung α als Parameter ergab sich somit

$$Q_u^{Th} = B \cdot \frac{h}{s_B} \cdot \frac{1}{\tan \alpha}$$

oder

$$Q_U^{Th} = \sigma_{fs} \cdot \mu_B \cdot \frac{b_o \cdot h}{\operatorname{tg} \alpha}$$

wobei σ_{fs} der effektiven, im Zugversuch ermittelten Fließspannung der Bügelbewehrung entspricht. Die Werte der theoretischen Schubbruchlasten sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Mit der Parametervariation liess sich die Schubbewehrung, die Diagonalenneigung und damit auch die theoretische Zugkraftlinie Z_U im Untergurt bestimmen.

$$Z_U = \frac{M}{h} + \frac{Q}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}$$

Damit sich der Schubbruchmechanismus auf der ganzen Länge des Prüfbereiches ausbilden konnte, wurde die Längsbewehrung im Untergurt in Abständen von 20 cm der Zugkraftlinie entsprechend abgestuft und, wie schon erwähnt, Stäbe verschiedenen Durchmessers stumpf aneinander geschweisst.

2.3.2 Querbiegebruchlast

Die Bestimmung der theoretischen Querbiegebruchlast bei reiner Querbeanspruchung erfolgte unter Berücksichtigung der entsprechenden Zug- und Druckbewehrung. Diese Werte sind in Tabelle 8 enthalten.

2.3.3 Gebrauchslasten

Die Gebrauchsbelastung bei reiner Längs- oder Querbeanspruchung wurde nicht aufgrund zulässiger Spannungen ermittelt, sondern durch Abminderung der Bruchlast um den effektiven Sicherheitskoeffizienten, der sich aus dem üblichen Sicherheitsbeiwert 1.8 sowie der Berücksichtigung der effektiven und der der Norm SIA 162 zugrunde gelegten Stahlfließspannung ergibt.

$$s_{eff} = 1.8 \cdot \frac{\sigma_{fs}}{\sigma_{f,norm}}$$

Die in Tabelle 8 angegebenen zulässigen Beanspruchungen liessen sich damit folgendermassen bestimmen:

$$Q_{zul} = \frac{Q_U^{Th}}{s_{eff}}$$

$$m_{zul} = \frac{m_U^{Th}}{s_{eff}}$$

3. VERSUCHSDURCHFUEHRUNG

3.1 Versuchsanlage

Die Balkenversuche wurden auf dem Aufspannboden der Prüfhalle der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA) in Dübendorf durchgeführt.

Die Versuchsanlage bestand im wesentlichen aus den Belastungseinrichtungen für die Längs- und Querbeanspruchung, den Lagern und den Mess- und Registrierinstrumenten.

3.1.1 Belastung für Längsbeanspruchung

Die Belastung für die Beanspruchung in Längsrichtung wurde mit zwei im Abstand von 2 m symmetrisch zur Balkenmitte angeordneten 100 t Pressen aufgebracht. Die beiden Pressen waren an Querrahmen befestigt und gaben ihre Last über Kugelgelenke genau in der Balkenschwerachse ab.

3.1.2 Belastung für Querbeanspruchung

Das Prinzip der Belastungseinrichtung für Querbiegung ist in Bild 3 dargestellt. Die Zugpressen befanden sich zwischen zwei als Hebelarme wirkenden I-Stahlträgern, welche die Belastung über Verteilbalken punktförmig in Abständen von 55 cm längs des Trägers auf die Flanschränder übertrugen. Bei einer Lastausbreitung von 45° ergab sich ein konstantes Querbiegemoment im Trägersteg. Die Zugpressen wurden derart gesteuert, dass das Querbiegemoment auf der ganzen Balkenlänge konstant war.

Dieses Belastungssystem erzeugte zusätzlich zur Querbiegung eine Normalkraft im Steg, die allerdings infolge der relativ gross gewählten Hebelarme sehr klein war. Bei einem Querbiegemoment von $m_q = 1.0 \text{ mt/m}$ und einer Bügelbewehrung vom Durchmesser 8 mm ($s_B = 20 \text{ cm}$), entstand im Stahl infolge dieser Normalkraft eine Spannung von

$$\Delta\sigma_q = \frac{m_q}{a} \cdot \frac{s_B}{2 \cdot F_{FeB}} = 0.17 \text{ t/cm}^2.$$

Verglichen mit der Fließspannung entsprach dies einem Fehler von 3%.

3.1.3 Lagerung

Die Balken waren auf allseitig kippbaren Gleitlagern, bestehend aus einem Kreuzgelenk und einem Teflonlager, abgestützt. Eine Stahlrohr-Haltestange fixierte den Balken in Längsrichtung und diente zur Aufnahme des Horizontalschubes bei einer eventuellen Schiefstellung der Hauptpressen.

Die Stabilisierung des Balkens in Querrichtung erfolgte bei den Auflagern durch seitliche Anschläge am unteren Flansch und beim Ansatz der Hauptpressen durch je eine Zugstange am oberen Flansch.

Das Drehmoment infolge der exzentrischen Querbelastungseinrichtung wurde durch Flanschbiegung auf die oben erwähnten seitlichen Anschläge resp. die Zugstangen abgetragen.

3.1.4 Messeinrichtungen

Aus Bild 15 ist die Anordnung der Messstellen ersichtlich. Die Messung der Kraft H_0 , des Querbiegemomentes und der Betonstauchungen erfolgte mittels Dehnungsmessstreifen, diejenige der Bügeldehnungen und der Dehnungen der Längsbewehrung mittels Deformetern von 20 cm. Für die Messung der Schiebungen wurden Deformeter von 28 cm verwendet.

Eine elektronische Datenerfassungsanlage speicherte die Messwerte auf einen Lochstreifen, der später mit dem Computer des RZETH ausgewertet werden konnte. Dieses Vorgehen ermöglichte ein rasches Aufzeichnen sämtlicher Dehnungen und der daraus resultierenden Verformungen.

3.2 Versuchsablauf

Eine erste Prüfung der Balken erfolgte in Laststellung I (Spannweite 6 m, Längsbelastung mit beiden Hauptpressen). Nach dem duktilen Bruch des entsprechend bemessenen Schubbereiches wurde ein Balkenlager umgesetzt und dadurch in der Laststellung II (Spannweite 4 m, Längsbelastung mit einer Hauptpresse) das Sprödbbruchverhalten des anderen Schubbereiches untersucht.

In Bild 13 ist der generelle Belastungsablauf dargestellt. Bis zum Erreichen der Gebrauchslast erfolgte die Laststeigerung in kleinen Stufen, wobei dem Rissbild und den Rissweiten besondere Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Nach dem Entstehen grosser Verformungen musste von der lastgesteuerten zur deformationsgesteuerten Belastung übergegangen werden.

Eine gleichzeitige Steigerung der Längs- und Querbewehrung war aus technischen Gründen nicht möglich. Deshalb wurde vorerst die Längsbelastung und anschliessend in mehreren Stufen die Querbewehrung aufgebracht. Nach einigen Lastwechseln im Gebrauchsbereich erfolgte eine Steigerung der Querbewehrung bis auf den durch die Parametervariation festgelegten Wert. Anschliessend wurde der Balken durch Erhöhung der Längsbelastung zum Bruch gebracht.

4. ERGEBNISSE

4.1 Tragverhalten im Gebrauchs- und Bruchzustand

Die Tabellen 5 bis 7 enthalten die Anfangs- und Endwerte der Querkraft bei jeder Laststufe sowie die zugehörige Querbiegebelastung. Die angegebenen Werte entsprechen der Querkraft (inkl. Eigengewicht) in einem 1.5 m vom Auflager entfernten Schnitt. Da die bei Querbiegung wirkende Normalkraft im Trägersteg sehr klein war, wurde sie nicht berücksichtigt.

Der generelle zeitliche Ablauf einer Laststufe ist aus Bild 14 ersichtlich. Die Querkraft wurde vorerst auf den vorgesehenen Wert Q_A gesteigert und während zwei Minuten konstant gehalten. Anschliessend erfolgte die Laststeuerung so, dass sich die Deformationen im Verlauf der Messungen nicht veränderten. Dadurch sank die Querkraft auf den Wert Q_E ab; m_Q blieb hingegen praktisch konstant.

Einen generellen Ueberblick über das Tragverhalten vermitteln die Bilder 43 bis 47 und 58 (Verlauf der Durchbiegung in Balkenmitte) und die Bilder 48 bis 57 und 59 (Durchbiegung längs des Balkens bei verschiedenen Laststufen).

Laststellung I

Der allgemeine Belastungsablauf ist in Bild 13 dargestellt.

Erste Belastungsphase:

In der ersten Phase wurde der Träger bis zum Gebrauchszustand belastet. Zunächst verformte sich der Balken im ungerissenen Zustand nur sehr wenig. Nach Auftreten der ersten Schubrisse fiel die Steifigkeit ab und nahm nach der Ausbildung des Schubfachwerkes einen konstanten Wert an.

Zweite Belastungsphase:

Die zweite Phase war durch wiederholte Belastungen im Bereich des Gebrauchszustandes gekennzeichnet. Dabei blieb die Steifigkeit in Längsrichtung bei einer Querkraftsteigerung mit oder ohne gleichzeitig wirkender Querbiegung unverändert.

Dritte Belastungsphase:

Die Belastung während der dritten Phase führte zum Bruch der Balken infolge Querkraft, wobei vorerst die Querbiegung auf den durch die Parametervariation festgelegten Wert gesteigert wurde. Bei der anschliessenden Erhöhung der Querkraft über den Gebrauchszustand blieb die im gerissenen Zustand festgestellte Längssteifigkeit zunächst erhalten, nahm dann jedoch bei der weiteren Laststeigerung kontinuierlich ab, bis sie beim Fliessen der Längsbewehrung den Nullwert erreichte.

In den Lastverformungskurven lassen sich zwei ausgeprägte Knickpunkte feststellen. Ein erster starker Steifigkeitsabfall, verursacht durch das Fliessen der Bügel auf der Zugseite, ist bei 70 bis 90% der Bruchlast erkennbar. Nach diesem Fliessbeginn, der wesentlich über dem errechneten Wert aus Superposition von Querkraft und Querbiegung liegt, muss die zusätzliche Last durch andere Tragelemente übernommen werden, was ein weiches Tragverhalten zur Folge hat. Der zweite markante Knickpunkt in der

Verformungskurve wird durch den Fliessbeginn der Bügel auf der Druckseite verursacht. Mit der Ausbildung eines Biegeschubmechanismus auf einer Länge von 1.0 bis 1.5 m verformten sich die Balken auch ohne wesentliche Steigerung der Querkraft sehr stark.

Der Bruch der Balken erfolgte infolge lokaler Ueberbeanspruchung. Bei den meisten Balken riss die Längsbewehrung unmittelbar neben den Schweissstellen, welche die grossen Stabdurchmesser mit den kleinen verbanden. Das Reißen der Bewehrung äusserte sich durch einen Knall mit gleichzeitig starkem Abfall der Last. Beim Balken S_4 erfolgte der Bruch durch Zerstörung der Krafteinleitungszone. Der Trägeroberflansch stauchte dabei infolge grosser Druckbeanspruchung und starker konzentrierter Krümmung.

Laststellung II

Die Belastung in Laststellung I, die im Schubbereich I zum Bruch führte, überschritt im Schubbereich II teilweise den Gebrauchszustand.

Die erste und zweite Belastungsphase der Laststellung II hatten deshalb eine geringe Bedeutung.

Dritte Belastungsphase:

Bei den Balken S_1 bis S_5 wurde in dieser Phase - bei konstanter Querbiegung - die Querkraft wiederum bis zum Bruch gesteigert. Die Steifigkeit blieb praktisch bis zum Bruch konstant; es bildete sich kein ausgeprägtes Fliessplateau aus. Nach relativ kleinen Verformungen brach der Widerstand der Balken rasch zusammen. Der Bruch kündigte sich durch starke Rissebildung und Abplatzen des Betons an der Oberfläche an. Diese Anzeichen eines typischen Querkraftspröbbruchs konnten vor allem bei den Balken S_1 , S_2 und S_4 beobachtet werden.

Der Balkenversuch S_6 bildete bezüglich des generellen Belastungsablaufes der dritten Phase eine Ausnahme. Im Gegensatz zu allen anderen Versuchen wurde hier bei der Querkraft des Gebrauchszustandes die Querbiegung bis zum Bruch gesteigert.

Besonders interessant war in diesem Falle die Feststellung, dass sich das Querbiegemoment beträchtlich über das Bruchmoment der reinen Plattenbiegung steigern liess (ca. 30%). Dies ist darauf zurückzuführen, dass einerseits die auf die Querbiegedruckzone verlagerten Querkraftdruckdiagonalen ein entlastendes Querbiegemoment erzeugten und andererseits die Trägerflansche einen Teil der Querbiegung über Torsion auf die im End- und Zwischenbereich verstärkten Stegzonen abgeben konnten.

4.2 Beanspruchung der Bewehrung

Die Dehnungen der Bewehrung wurden mit Setzdehnungsmessern der Basis 20 cm gemessen. Die Messstellen für die Bügel befanden sich beidseits des Steges, diejenige der Längsbewehrung in Flanschmitte an der Balkenunterseite.

4.2.1 Belastungs-Dehnungs-Diagramme

Laststellung I

In den Bildern 16 bis 21 sind die Belastungs-Dehnungs-Diagramme der Bügel- und Längsbewehrung aufgezeichnet. Aus diesen Kurven ist, insbesondere beim Versuch S_1 , die

Querkraftumlagerung deutlich ersichtlich. Bei Fliessbeginn der Bügel auf der Zugseite übernahmen die Bügel der Druckseite den gesamten weiteren Lastzuwachs. Die Traglast wurde erst erreicht als auch die Bügel auf der Druckseite flossen.

Laststellung II

Die Bilder 22 bis 26 zeigen analog den Belastungs-Dehnungs-Verlauf in der Laststellung II. Die erste aufgezeichnete Laststufe entspricht der Vordehnung aus Laststellung I. Der Kurvenverlauf bei Laststellung II zeigt, dass vor dem Erreichen der Traglast das Fliessplateau nicht so ausgeprägt war wie bei Laststellung I. Obwohl die Mehrzahl der Bügel auf der Druckseite die Fliessbeanspruchung noch nicht erreicht hatten, liess sich die Querkraft nicht mehr weiter steigern, d.h. die Bewehrung war im Gegensatz zur Laststellung I nicht massgebend für die Traglast. Vor allem die Balken S_1 , S_2 und S_4 wiesen eine eindeutige Ueberarmierung auf.

In den Bildern 27 bis 38 ist für die massgebenden Laststufen der Verlauf der Dehnungen der Bügel- und Längsbewehrung längs des Versuchsträgers dargestellt. Diese Bilder zeigen die beträchtliche Länge des Fliessbereiches (Länge des Schubmechanismus), der durch die sorgfältige Abstufung der Längsbewehrung erreicht werden konnte.

In den Bildern 66 bis 68 sind die gemittelten Dehnungen der Bügel- und Längsbewehrung (Mittelwerte aus den in den Bildern 16 bis 26 angegebenen Messstellen) der verschiedenen Versuche und Laststellungen in Funktion von Q/Q_U^{Th} aufgezeichnet. Die Bruchquerkraft Q_U^{Th} entspricht dabei der nach dem Fachwerkmodell ermittelten Schubtragfähigkeit bei reiner Längsbeanspruchung.

Beim direkten Vergleich der Versuche in Laststellung I fällt der Träger S_3 (Bild 66) dadurch auf, dass seine Bügel eine grössere Beanspruchung aufwiesen als diejenigen der anderen Versuchsträger, obwohl die Querbiegung nur unwesentlich grösser war. Dieses Verhalten ist aus der mit flacher Diagonalenneigung ($\tan \alpha < 0.5$) durchgeführten Bemessung des Balkens S_3 zu erklären. Die Schubbereiche der Laststellung II zeigen ähnlich starke Bügelbeanspruchungen, da die Bemessung, ausser beim Balken S_2 , ebenfalls mit flacher Diagonalenneigung durchgeführt wurde.

4.2.2 Beanspruchung der Bewehrung im Gebrauchszustand

Die Beanspruchung der Bewehrung im Gebrauchszustand ist aus den Bildern 69 bis 74 ersichtlich. Die Werte Q_{zul} und m_{zul} wurden, wie bereits erwähnt, aus der theoretischen Schubbruchquerkraft Q_U^{Th} und dem Querbiegemoment m_U^{Th} bei reiner Längs- bzw. Querbeanspruchung bestimmt (Abschnitt 2.3.3). ϵ_{zul} ist dabei die der zulässigen Stahlspannung entsprechende Dehnung (SIA-Norm).

In den Q - ϵ -Diagrammen sind sämtliche Laststufen der ersten und zweiten Belastungsphase, in den m - ϵ -Diagrammen dagegen nur das Dehnungsverhalten der Bügel bei annähernd konstanter Querkraft aufgezeichnet. Der Spannungszuwachs der Bügel auf der Zug- und Druckseite entspricht im wesentlichen dem theoretischen Verhalten bei Biegung mit Normalkraft. Die Grösse des Spannungszuwachses bzw. das daraus resultierende Querbiegemoment ist jedoch wesentlich kleiner als das effektiv aufgebrachte Querbiegemoment. Dies lässt sich damit erklären, dass sich die Querkraft bei einer Steigerung der Querbiegung in die ungerissene Stegdruckzone verlagert. Die exzentrisch wirkende Schubkraft bzw. die exzentrisch wirkenden Druckdiagonalen haben aber dadurch ein der Querbiegung entgegengesetztes Moment zur Folge. Die Querkraftverlagerung wird nicht

durch die Stahldehnung auf der Zugseite veranlasst - die Bugelbeanspruchung befindet sich noch im elastischen Bereich - , sondern allein dadurch, dass sich die Querkraft-Druckstreben nur auf der ungerissenen Druckseite der Stege ausbilden können.

Die Querkraftumlagerung im Gebrauchszustand, d.h. im elastischen Bereich, ist von entscheidender Bedeutung. Sie bewirkt, dass die Bügeldehnung auf der Zugseite, wie aus den Q - ϵ -Diagrammen ersichtlich ist, bei voller Ueberlagerung von Q_{zul} und m_{zul} die zulässige Dehnung nicht wesentlich übersteigt.

4.2.3 Bruch infolge Querbiegung

Die Bilder 75 und 76 enthalten die in Laststellung II gemessenen Bügeldehnungen des Balkens S_6 , dessen Belastungsablauf von den vorhergehenden Versuchen abwich (Bruch durch Steigerung der Querbiegung bei konstanter Querkraft Q_{zul}). Die Messungen zeigten deutlich, dass die Querbiegung nicht allein durch die Bügel, sondern zu einem beträchtlichen Teil auch durch die exzentrisch wirkende Querkraft aufgenommen wurde. Bei m_u^{Th} bildete sich deshalb noch kein Fliesplateau aus. Vor dem Erreichen des Querbiegebruchmomentes wurde allerdings auch ein Teil der im Schubbereich aufgebraachten Querbiegung über Flanschtorsion auf die stärker bemessenen Zonen der Stege übertragen. Diese Lastumlagerung in der Endphase der Laststeigerung erfolgte jedoch erst bei starkem Steifigkeitsabfall, und sie betrug dem Torsionswiderstand des Zugflansches entsprechend höchstens 0.35 mt, d.h. ca. 10% der im geprüften Schubbereich aufgebraachten Querbiegung.

4.3 Beanspruchung des Betons

4.3.1 Druckflansch

Die Betonstauchungen wurden mit Setzdehnungsmessern der Basis 20 cm an der Oberseite des Druckflansches gemessen. Der Verlauf der Betonstauchungen längs der Balken ist in den Bildern 39 bis 42 dargestellt. Die Werte entsprechen den Erwartungen, weisen jedoch zum Teil erhebliche Streuungen auf.

Interessant war das starke lokale Anwachsen der Stauchungen nach Fliesbeginn der Längsbewehrung. Dieser Stauchungszuwachs lässt sich mit der starken lokalen Flanschbiegung infolge Längsbeanspruchung erklären. Hier begann auch die beim Bruch beobachtete Zerstörung des Druckflansches.

4.3.2 Betondruckdiagonalen im Steg

Aufgrund des komplizierten Risseverhaltens (Horizontal- und Schragriffe) wurde auf eine Messung der Betondruckstauchungen im Steg verzichtet. Ein erst nach der Rissbildung und unter einem Winkel von 45° aufgeklebter Dehnungsmessstreifen diente zur Ueberwachung der Betonbeanspruchungen. Die damit ermittelten Deformationen erreichten in Laststellung II Werte in der Grössenordnung der Bruchstauchungen. Die hohe Beanspruchung des Betons zeigte sich auch durch Abplatzungen an der Betonoberfläche.

4.4 Verformungen

4.4.1 Schiebungen

Die Schiebungen γ in den Schubbereichen wurden mit Setzdehnungsmessern durch Ausmessen der Abschnittseiten bestimmt. [2] enthält eine eingehende Beschreibung der Berechnung der Winkeländerungen in den vier Ecken des quadratischen Messabschnittes und der sich daraus ergebenden Schiebungen.

Die Schiebungen in Abhängigkeit der Querkraft sind in den Bildern 60 bis 65 aufgetragen und zeigen deutlich die Länge des Schubmechanismus. Aus den auf der Druck- und Zugseite ermittelten Schiebungen ging hervor, dass die Verformungen auf beiden Seiten übereinstimmten, obwohl die Bügeldehnungen erhebliche Unterschiede aufwiesen. Dies lässt auf eine gegenseitige Unterstützung der beiden Steghälften in der Aufnahme der Querkraft schliessen. Die starke Druckseite hilft der durch Querbiegung geschwächten Zugseite und ermöglicht bei unterarmierten Stegen eine volle Interaktion zwischen Schub- und Querbiegung.

4.4.2 Durchbiegungen

Die Durchbiegungen wurden an der Balkenunterseite gemessen und sind in Funktion der Querkraft in den Bildern 43 bis 47 und 58 aufgetragen. Aus diesen Kurven ist das Tragverhalten und insbesondere der Unterschied zwischen dem duktilen und spröden Bruchverhalten deutlich erkennbar. Die Bilder 48 bis 57 und 59 zeigen den Verlauf der Durchbiegungen längs der Balken. Auffallend dabei ist die asymmetrische Trägerverformung, die sich aus den ungleich stark bewehrten Schubbereichen ergibt.

4.5 Risseverhalten

4.5.1 Risseverlauf

Die Bilder 77 und 78 vermitteln einen Ueberblick über das Risseverhalten der Versuchsträger in verschiedenen Laststufen. Der Risseverlauf wurde mit einem Filzschreiber nachgezogen und die Rissweiten in $V100$ mm angegeben. Die ersten Risse im Schubbereich entstanden unter einer Neigung von 45° , wobei die Beanspruchung bei 50 bis 70% der Gebrauchslast lag. Infolge Querbiegung bildeten sich auf der gesamten Steghöhe Horizontalrisse. Nach den Lastwechseln im Gebrauchszustand entstand bei zunehmender Querkraft im wesentlichen folgendes Rissebild:

Zugseite:

Die neu auftretenden Risse waren sehr flach geneigt. Die Horizontalrisse blieben in ihrer Weite konstant.

Druckseite:

Die relativ wenigen Schubrisse wiesen durchwegs eine Neigung von mehr als 45° auf. Die Steigerung der Querkraft änderte das Rissebild nur unwesentlich. Allerdings nahm bei Fließbeginn der "Druckbügel" die Anzahl und Grösse der Schubrisse auf der Druckseite stark zu.

4.5.2 Rissweiten

Die Rissweiten wurden mit einem Rissemassstab und einer Genauigkeit von ca. 5/100 mm gemessen. In den Bildern 79 und 80 sind die Werte sämtlicher Versuchsbalken aufgetragen. Die Beanspruchung in der mit einem Doppelkreis bezeichneten Laststufe entspricht der Ueberlagerung der zulässigen Querkraft mit der zulässigen Querbiegung.

Aus Bild 79 (Laststellung I) ist ersichtlich, dass der Träger S_3 eine verhältnismässig grosse Rissweite aufwies. Ursache dafür war die flache Diagonalenneigung, mit der die Bemessung durchgeführt wurde. Die Stege der Balken S_4 und S_5 , die besonders kleine Rissweiten zeigten, waren asymmetrisch bewehrt. Das Verhältnis der Bügelbewehrung auf der Druckseite zu jener der Zugseite betrug 0.6, resp. 0.5. In Laststellung II wiesen die Balken grössere Risse auf. Dies ist wiederum darauf zurückzuführen, dass in diesem Schubbereich alle Balken, ausser S_2 , mit flacher Diagonalenneigung bemessen wurden, und dass die Vorbelastung infolge Laststellung I bereits über dem Gebrauchszustand lag.

4.6 Vergleich zwischen Norm und Versuchen

4.6.1 Vergleich der experimentellen Bruchlast mit der duktilen Schubtragfähigkeit bei reiner Längsbeanspruchung

In den Bildern 86a und 86b sind die experimentell ermittelten Schubtraglasten Q_u^{Ex} in einem bezogenen Querkraft-Querbiege-Interaktionsdiagramm dargestellt. Bezugsgrößen sind die theoretisch bestimmten Traglasten für Querkraft und Querbiegung bei reiner Längs- und Querbeanspruchung.

Bild 84a zeigt die Versuche in Laststellung I. Daraus ist ersichtlich, dass bei unterarmierten Trägern auch bei grosser Querbiegung die volle, der gesamten Stegbewehrung entsprechende Schubtragfähigkeit erreicht wird. Ein grosses Querbiegemoment bewirkt lediglich einen früheren Fliessbeginn der Bügel auf der Zugseite. Das etwas ungünstigere Risseverhalten gegenüber der reinen Längsbeanspruchung lässt sich bei Schub und Querbiegung durch asymmetrische Stegbewehrung (Verlagerung der Stegbewehrung auf die Zugseite) verbessern; dies ist beim Versuch S_5 deutlich erkennbar.

In Bild 84b sind die Versuchsergebnisse der Laststellung II aufgetragen. Die Bruchlasten lagen durchwegs deutlich unter der der Bewehrung entsprechenden Traglast. Die Bügel auf der Zugseite und die Längsbewehrung kamen zwar auch bei diesen Versuchen zum Fließen, die Bügel auf der Druckseite dagegen nicht oder nur sehr beschränkt. Daraus kann geschlossen werden, dass die Bruchursache nicht die Ueberbeanspruchung der Bewehrung, sondern ein Versagen der Betondruckzone war.

4.6.2 Vergleich der experimentellen Bruchlast mit der Schubtragfähigkeit überarmierter Querschnitte (obere Schubspannungsgrenze bei reiner Längsbeanspruchung)

Der Vergleich der experimentell festgestellten nominellen Schubspannung mit der in der Norm vorgesehenen oberen Schubspannungsgrenze bei reiner Längsbeanspruchung gibt Aufschluss über das Sprödbbruchverhalten bei kombinierter Beanspruchung durch Schub und Querbiegung.

In der Laststellung I lag die nominelle Schubspannung bei 40 bis 50 kg/cm² oder, verglichen mit der rechnerischen Schubspannung, bei $3.5 \cdot \tau_r$ bis $4 \cdot \tau_r$. Alle diese Versuche

zeigten eindeutig ein duktilen Bruchverhalten.

Bei den Versuchen in Laststellung II lag die Schubbeanspruchung bedeutend höher, und alle Versuche wiesen Anzeichen eines Sprödbrechens auf: oberflächliches Abplatzen des Betons, kein ausgeprägtes Fließplateau, Bruch vor dem Erreichen der duktilen Traglast.

Aus Bild 85 ist die beim Bruch festgestellte Schubspannung ersichtlich. Sie liegt bei allen Versuchen unter dem Normwert. Da die obere Schubspannungsgrenze $6 \cdot \tau_r$ (bei reiner Längsbeanspruchung) vorsichtig angesetzt ist, muss der stark verminderten Sprödbrechensicherheit bei Schub mit Querbiegung umso mehr Beachtung geschenkt werden. Das Bild 87 zeigt die nominelle Schubspannung der Träger S_1 bis S_5 in Laststellung II im Vergleich zu den Versuchen [3], [4], [5] bei reiner Längsbeanspruchung.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

5.1 Dimensionierung der Bewehrung

Die durchgeführten Versuche haben eindeutig gezeigt, dass eine Ueberlagerung der Bewehrungsquerschnitte für Schub und Querbiegung nicht notwendig ist. Es genügt, wenn die Bewehrung für die massgebende der beiden Beanspruchungen bemessen wird. Die volle Interaktion zwischen Schub und Querbiegung bei duktilem Verhalten lässt sich darauf zurückführen, dass sich die Lage der Querkraft im Stegquerschnitt optimal einstellt. Die Querkraftverlagerung ist allerdings nur dann möglich, wenn der Gleichgewichtszustand des Trägers bei exzentrischer Querkraft gewährleistet ist. Bei den Versuchsträgern verursachte die Querkraftverlagerung Torsion, die vorwiegend durch Flanschbiegung aufgenommen wurde. Bei den im Brückenbau üblichen Querschnitten ergibt sich infolge der Querkraftverlagerung keine Störung des Gleichgewichtes.

Zur Verbesserung des Risseverhaltens im Gebrauchszustand sind bei Schub und Querbiegung folgende Massnahmen zu treffen:

- Bei symmetrischer Stegbewehrung sollte die der Bemessung zugrunde gelegte Diagonalenneigung nicht flacher als 45° sein.
- Eine flachere Diagonalenneigung sollte nur bei asymmetrischer Bügelbewehrung in Betracht gezogen werden (höhere Stegbewehrung auf der Zugseite).

5.2 Betonabmessungen

Die Versuche in Laststellung II zeigten eindeutig, dass die Sprödbruchsicherheit schubbeanspruchter Träger durch Querbiegung stark reduziert wird. Die Ursache hierfür liegt wiederum bei der Verlagerung der Querkraft in die Biegedruckzone; die Superposition der Betonbeanspruchungen infolge Querkraft (Druckdiagonalen) und Querbiegung führte zu einem vorzeitigen Versagen der Druckzone des Trägersteges.

Eine genaue Bestimmung der oberen Schubspannungsgrenze in Funktion des Querbiegemomentes ist aufgrund der vorliegenden Versuche nicht möglich. Es zeigt sich jedoch, dass mit dem Erreichen des Rissmomentes infolge Querbiegung die obere Schubspannungsgrenze stark abfällt; unter Berücksichtigung einer analogen Sprödbruchsicherheit wie bei reiner Längsbeanspruchung sollte sie bei ca. $4 \cdot \tau_r$ angesetzt werden. Bei grösseren Querbiegemomenten ist keine weitere Reduktion der Schubspannungsgrenze angezeigt, erst kurz vor dem Erreichen des Sprödbruchmomentes infolge Querbiegung ist ein vollständiges Absinken der Schubspannungsgrenze auf null zu erwarten.

ZUSAMMENFASSUNG

Das am Institut für Baustatik und Konstruktion der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich durchgeführte Forschungsprojekt "Schub bei Querbiegung" umfasste eingehende Untersuchungen über das Verhalten schubbeanspruchter Träger, deren Stege auf ihrer gesamten Länge durch eine konstante Querbiegung beansprucht werden. Diese Untersuchungen basierten auf der Prüfung von sechs I-förmigen Stahlbetonbalken in je zwei Laststellungen.

Das Ziel des Forschungsprojektes bestand in der Abklärung der beiden folgenden Probleme:

- Bemessung der Stegbewehrung,
- Ermittlung der oberen Schubspannungsgrenze.

Die Hauptparameter der Versuchsträger bestanden einerseits aus den Schubkennwerten (Bügelbewehrung, Längsbewehrung und Diagonalenneigung) und andererseits aus den Querbiegekennwerten (Querbiegebeanspruchung, Verhältnis der Bügelbewehrung auf der Zug- und Druckseite der Stege).

Die Parameter waren so gewählt, dass die Traglast der Versuchsbalken in Laststellung I durch Ueberbeanspruchung der Bewehrung (duktils Verhalten) und in Laststellung II durch Versagen der Betondruckzone (Spröddbruch) erreicht wurde.

Die Ergebnisse der Versuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Bei duktilem Verhalten wird die Schubtraglast durch Querbiegung nicht beeinflusst, sofern eine Verlagerung der Querkraft in die Stegdruckzone ohne Störung des Gleichgewichtes möglich ist. Es besteht somit eine volle Interaktion zwischen Querkraft und Querbiegung, d.h. die Stegbewehrung muss nur für die massgebende der beiden Beanspruchungen bemessen werden. Im Gebrauchszustand ist die Beanspruchung der Bewehrung auf der Stegzugseite infolge der Querkraftverlagerung in die Stegdruckzone wesentlich kleiner als bei voller Ueberlagerung von Schub und Querbiegung. Das Rissebild lässt sich durch eine Diagonalenneigung von ca. 45° (vgl. Fachwerkmodell der Richtlinie 34 der SIA Norm 162) oder durch asymmetrische Anordnung der Stegbewehrung günstig beeinflussen.

Bei sprödem Tragverhalten hat eine das Rissmoment übersteigende Querbiegung einen starken Abfall der Schubtraglast zur Folge. Genaue Werte für die obere Schubspannungsgrenze lassen sich aufgrund der relativ kleinen Versuchszahl nicht angeben, da bei einem Spröddbruch erhebliche Streuungen auftreten. Die nominelle Schubspannung bei Schub mit Querbiegung sollte jedoch 60% der für reinen Schub festgelegten Schubspannungsgrenze nicht überschreiten.

RESUME

Dans le cadre de son programme de recherches "cisaillement avec flexion latérale", l'Institut de Statique et de Construction de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich s'est livré à une étude approfondie du comportement de poutres soumises au cisaillement, dont les âmes sont sollicitées sur toute leur longueur par une flexion latérale constante. Ces recherches s'appuient sur les essais effectués sur six poutres en béton armé à section en I, selon deux schémas de charge.

Ce programme de recherches avait pour but d'éclaircir les deux points suivants:

- dimensionnement de l'armature des âmes,
- définition de la limite supérieure des contraintes tangentielles.

Les poutres soumises aux essais se différenciaient d'une part par des paramètres intéressant le cisaillement (armatures en long, étriers, inclinaison des diagonales) et d'autre part par des paramètres intéressant la flexion latérale (niveau de sollicitation, rapport des surfaces des étriers entre la face tendue et la face comprimée).

On a choisi les paramètres de telle sorte que les poutres soumises au schéma de charge I atteignent leur charge ultime par fluage des armatures (comportement ductil), tandis que le schéma de charge II provoquait une rupture de la zone comprimée du béton (rupture fragile).

On peut résumer les résultats obtenus de la façon suivante:

Dans le cas du comportement ductil, la charge ultime de cisaillement n'est pas influencée par la flexion latérale, tant que les efforts tranchants peuvent se redistribuer dans la zone comprimée de l'âme sans influencer l'état d'équilibre. Il y a donc interaction complète entre l'effort tranchant et la flexion latérale, c'est-à-dire qu'on ne dimensionne l'armature de l'âme que pour le type de sollicitation déterminant. Dans l'état de service, la sollicitation des armatures dans la zone tendue de l'âme est - du fait de la redistribution des efforts tranchants dans la zone comprimée de l'âme - nettement inférieure.

On peut obtenir une répartition plus favorable des fissures grâce à une inclinaison d'environ 45° des diagonales (voir le modèle du treillis de la directive 34 de la norme SIA 162) ou grâce à un ferrailage asymétrique de l'âme.

Dans le cas de rupture fragile, toute flexion latérale excédant le moment de fissuration entraîne une forte diminution de la charge ultime de cisaillement. En se basant sur un nombre restreint d'essais, on ne peut pas encore indiquer les valeurs exactes de la limite supérieure des contraintes tangentielles, les résultats d'essais de rupture fragile laissant apparaître une assez grande dispersion. La contrainte tangentielle nominale en cas de cisaillement avec flexion latérale ne devrait toutefois pas dépasser 60% de la limite supérieure des contraintes tangentielles fixée pour le cisaillement pur.

SUMMARY

The research project "Shear with Transverse Bending", performed at the Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, covered detailed studies on the behavior of beams of which the webs were loaded under combined shear and transverse bending. The transverse bending was constant along the beams. The studies were based on a test series of six I-shaped reinforced concrete beams. Each beam was tested with two different load arrangements.

The aim of the research project was to analyse the following two problems:

- Design of the shear reinforcement
- Determination of the upper limit of shear stresses

The principal parameters were composed of characteristic values of shear (stirrup reinforcement, longitudinal reinforcement and inclination of the concrete struts) and of characteristic values of transverse bending (intensity of transverse bending, ratio of the stirrup reinforcement in the tension zone and compression zone of the web).

The parameters were chosen in such a way that the ultimate load of the test beams was reached after yielding of the reinforcement (ductile behavior) with the first load arrangement and after crushing of the concrete (brittle failure) with the second load arrangement.

The test results may be summarized as follows:

If the beam shows a ductile behavior the ultimate shear force is not influenced by transverse bending as far as the shear force may be shifted towards the compression zone of the web without disturbing equilibrium. A full interaction between shear force and transverse bending can be observed; i.e. the web reinforcement has to be designed only for the dominant of the two loadings. Under service load the stirrup stresses in the tension zone of the web are essentially lower than expected according to the superposition of shear and transverse bending because the shear force is shifted towards the compression zone. The crack pattern may be influenced favorably with struts inclined at about 45° or with an asymmetric web reinforcement.

If the beam shows a brittle failure the ultimate shear force decreases substantially as far as the transverse bending moment exceeds the cracking moment. The rather small number of tests does not allow the exact determination of the upper limit of shear stresses because a large variation of the test results is possible. However, the calculated shear stresses of transverse bent webs should not exceed 60% of the upper limit fixed for pure shear.

VERDANKUNGEN

Dieser Versuchsbericht wurde im Rahmen des Forschungsprojektes "Schub bei Querbiegung" am Institut für Baustatik und Konstruktion der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) ausgearbeitet. Für die grosszügige finanzielle Unterstützung dieses Projektes möchte ich dem

Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau, Bern

und dem

Kant. Autobahnamt Bern

aufrichtig danken.

Der experimentelle Teil der Untersuchungen wurde an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA) in Dübendorf durchgeführt. Für das Entgegenkommen danke ich den Herren Prof. Dr. Th. Erismann, Direktionspräsident der EMPA sowie Dr. M. Ladner, Vorsteher der Abteilung Massivbau. Ausserdem gilt mein Dank der Monteforno Stahl- und Walzwerke AG in Bodio, die sämtliche Bewehrungsstähle für die Versuchsbalken zur Verfügung stellte.

Bei der Versuchsdurchführung haben die Herren K. Bucher und C. Tiniç mitgewirkt. Herr M. Baumann, dipl. Bauing., befasste sich mit den messtechnischen Problemen der erweiterten Mess- und Datenerfassungsanlage. Für die Gestaltung des Berichtes und die Zeichnungen war Herr G. Göseli zuständig. Für diese Mitarbeit möchte ich den Genannten wie auch den andern an der Versuchsdurchführung Beteiligten bestens danken.

Prof. Dr. C. Menn

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Lampert P., Wegmüller A., Thürlimann B.: "Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf Festigkeitswerte von Armierungsstählen", Institut für Baustatik, ETH Zürich, Bericht Nr. 10, April 1967.
- [2] Lampert P., Thürlimann B.: "Torsionsversuche an Stahlbetonbalken", Institut für Baustatik, ETH Zürich, Bericht Nr. 6506-2, Juni 1968. Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart.
- [3] Leonhardt F., Walther R.: "Versuche an Plattenbalken mit hoher Schubbeanspruchung", Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft Nr. 152, 1962.
- [4] Robinson J.R.: "Essais à l'effort tranchant de poutres à âme mince en béton armé", Annales des ponts et chaussées, Mars-Avril 1961.
- [5] Slater W.A., Lord A.R., Zippradt R.R.: "Shear Tests of Reinforced Concrete Beams", Technologic Papers of the Bureau of Standards, No. 314, 1926.

BEZEICHNUNGENGeometrische Grössen

F_e	Querschnittsfläche eines Bewehrungsstahles
F_{eB}	Querschnittsfläche eines Bügels
s_B	Bügelabstand
h	statische Höhe des Trägers
b_o	Stegbreite
a	Abstand zwischen Querbiegebelastung q und Querschnittsachse
e	Exzentrizität der Querkraft

Kraftgrössen

m_q	vorhandenes Querbiegemoment
m_{zul}	zulässiges Querbiegemoment
m_u^{Th}	theoretisches Querbiegebruchmoment
Q	vorhandene Querkraft
Q_{zul}	zulässige Querkraft
Q_u^{Th}	theoretische Bruchquerkraft
Q_u^{Ex}	experimentelle Bruchquerkraft
Q_{fZ}	Querkraft bei Flie遥beginn der Zugbügel
Q_{fD}	Querkraft bei Flie遥beginn der Druckbügel
Q_{fL}	Querkraft bei Flie遥beginn der Längsbewehrung
Q_A	Querkraft bei Beginn der Laststufe
Q_E	Querkraft am Ende der Laststufe
Q_b	Schubwiderstandsanteil
M	vorhandenes Biegemoment
Z_U	Zugkraft im Untergurt
B	Zugkraft eines Bügels
P	Kolbenkraft der Hauptpressen
q	Kolbenkraft der Querbiege-Zugpressen
H_O, H_U	seitliche Festhaltekräfte
A	Auflagerkräfte
F	Festhaltekraft in Längsrichtung

Festigkeitswerte, Spannungen

τ^*	nominelle Schubspannung
τ_Q^*	nominelle Schubspannung infolge Querkraft
$\tau_{Q_u}^{*(Ex)}$	nominelle Schubspannung bei Bruch

τ_r	rechnerische Schubspannung
σ_{fs}	Fliessspannung des Stahls bei statischer Belastung
σ_{fd}	Fliessspannung des Stahls bei dynamischer Belastung
β_{zs}	Zugfestigkeit des Stahls bei statischer Belastung
β_{zd}	Zugfestigkeit des Stahls bei dynamischer Belastung
β_w	Würfeldruckfestigkeit des Betons
β_{bz}	Biegezugfestigkeit des Betons
β_p	Prismendruckfestigkeit des Betons
σ_e	Stahlspannung
E_e	Elastizitätsmodul des Stahls
$\sigma_{f,norm}$	Fliessspannung des Stahls nach Norm
$\Delta\sigma_q$	zusätzliche Druckspannung im Steg infolge einer durch das Belastungssystem bedingten Normalkraft

Verformungen

$\epsilon_{l\ddot{a}ngs}$	Längsdehnung
ϵ_{quer}	Querdehnung
ϵ_{ev}	Stahldehnung bei Beginn der Verfestigung
λ_{gl}	Gleichmassdehnung
$\dot{\epsilon}$	Dehnungsgeschwindigkeit bei Zugversuch des Stahls
ϵ_e	Stahldehnung
ϵ_f	Stahldehnung bei Fliessbeginn
ϵ_{zul}	Stahldehnung bei zulässiger Stahlspannung
δ	Durchbiegung
γ	Schiebung
r	Rissweite
k	Krümmung

Dimensionslose Parameter

α	Neigung der Betondruckdiagonalen
μ_z	Bügelbewehrungsgehalt auf der Zugseite
μ_D	Bügelbewehrungsgehalt auf der Druckseite
μ_B	rechnerischer Bügelbewehrungsgehalt
s_{eff}	effektiver Bruchsicherheitsfaktor

Allgemeine Bezeichnungen

S	Versuchsträger Schub bei Querbiegung
I, II	Laststellung, Schubbereich

LS	Laststellung
1,2...	Phasen, Laststufen, Versuchsträger

Indizes

b	Beton
e	Stahl
u	Bruch
Th	theoretisch ermittelter Wert
Ex	experimentell ermittelter Wert
Z	Zugseite des Steges
D	Druckseite des Steges
B	Bügel
O	oben
U	unten
A	Beginn der Laststufe
E	Ende der Laststufe
f	Fliessen
d	dynamisch
s	statisch

Balken	S ₀ Vorversuch		S ₁		S ₂		S ₃		S ₄		S ₅		S ₆	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Schubbereich														
$\frac{m_g}{m_u}$	0,43	0,56	0,75	0,56	0,85	0,56	0,85	0,85	0,85	0,56	0,85	0,56	0,5	1,0
tg α	1,0	0,84	1,0	0,6	1,0	1,5	0,6	0,6	1,0	0,6	1,0	0,6	1,0	0,6
$\frac{\tau_{q\bullet}}{5 \cdot \tau_r}$	0,57	0,81	0,5	1,29	0,5	1,03	0,82	1,29	0,63	1,05	0,74	1,24	0,5	0,82
$\frac{\mu_z}{\mu_D}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,57	1,57	2,0	2,0	1,0	1,0
$\mu_B = \mu_z + \mu_D$ [%]	0,67	1,0	0,5	0,785	0,5	1,57	0,5	0,785	0,643	0,643	0,75	0,75	0,5	0,5
Haupt - Parameter	Querbiegung	Sprödbbruch	Vergleichs - balken	Sprödbbruch	Querbiegung	Diagonalen - neigung	Diagonalen - neigung	Querbiegung Sprödbbruch	$\mu_z > \mu_D$	$\mu_z > \mu_D$	$\mu_z > \mu_D$	$\mu_z > \mu_D$ Sprödbbruch	Querbiegung	Bruch auf Querbiegung

Tabelle 1 : Parametervariation

Nenn ϕ mm	F_e cm ²	σ_{fs} t/cm ²	σ_{fd} t/cm ²	β_{zs} t/cm ²	β_{zd} t/cm ²	ϵ_{ev} %	λ_{GL} %
8	0,50	5,50	5,67	6,65	7,00	2,66	16
10	0,79	5,41	5,61	6,66	7,04	2,66	16
12	1,13	5,82	6,07	7,35	7,70	2,42	14
16	2,01	5,51	5,71	6,85	7,16	2,62	13
20	3,14	5,11	5,32	6,70	7,07	2,18	13

Tabelle 2 : Festigkeitswerte des BOX - Stahles

Balken	Sand 0÷4mm	Kies 4÷8mm	Kies 8÷16mm	Zuschlag- stoffe kg/m ³	Zement PC kg/m ³	Wasser l /m ³	W/ Z Faktor	Raum- gewicht kg/m ³	Konsistenz Verdichtungsmass
$S_1 \div S_3$	49%	23%	28%	2365	349	189	0,54	2365	plastisch 1,09
$S_4 \div S_6$	49%	23%	28%	2370	320	193	0,60	2370	plastisch 1,15

Tabelle 3 : Zusammensetzung des Frischbetons

Balken	Mischung	Anzahl Proben	β_w kg/cm ²	β_{bz} kg/cm ²	$\epsilon_{l\ddot{a}ngs}$ ‰	ϵ_{quer} ‰	β_p kg/cm ²
S_1	1	2	406	42	2,5	1,6	320
	2	3	389	43	—	—	—
S_2	1	2	433	37	2,3	1,1	315
	2	3	411	41	—	—	—
S_3	1	2	437	44	2,5	1,3	350
	2	3	407	41	—	—	—
Mittelwert $S_1 \div S_3$			412 (V=4,6%)	41 (V=7,5%)	2,43	1,33	328
S_4	1	3	331	36	—	—	—
	2	2	338	33	1,86	1,07	244
S_5	1	3	334	44	—	—	—
	2	2	332	31	1,75	0,85	267
S_6	1	3	302	36	—	—	—
	2	2	299	31	1,6	0,60	214
Mittelwert $S_4 \div S_6$			323 (V=5%)	36 (V=14%)	1,74	0,84	242

Tabelle 4 : Festigkeitswerte der Betonprismen nach 28 Tagen

S ₁ Laststellung I			
Last - stufe	Q _A t	Q _E t	m _q mt/m'
1	1,3	1,3	0
2	7,4	6,6	0
3	9,55	9,0	0
4	9,0	8,8	0,46
5	8,8	8,6	0,62
6	1,3	1,3	0
7	9,55	9,1	0
8	9,05	8,9	0,62
9	8,95	8,7	0,83
10	12,65	11,9	0,83
11	15,65	14,8	0,83
12	16,8	15,7	0,83
13	17,4	16,6	0,83
14	17,8	16,4	0,83
15	18,1	14,4	0,83
16	15,9	15,0	0,83
17	1,1	1,1	0
S ₁ Laststellung II			
18	1,3	1,3	0
19	17,8	17,05	0
20	17,05	16,55	0,83
21	20,5	19,7	0,83
22	1,3	1,3	0
23	20,5	19,3	0
24	19,3	19,3	0,83
25	19,3	19,3	0,94
26	23,1	22,2	0,94
27	27,1	25,5	0,94
28	31,1	29,45	0,94
29	36,1	33,3	0,94
30	37,1	34,1	0,94

S ₂ Laststellung I			
Last - stufe	Q _A t	Q _E t	m _q mt/m'
1	1,1	1,1	0
2	6,1	5,7	0
3	8,6	8,1	0
4	8,1	7,9	0,55
5	1,1	1,1	0
6	6,1	6,0	0
7	6,0	6,0	0,55
8	8,6	8,2	0,55
9	1,1	1,1	0
10	8,6	8,3	0,55
11	8,3	8,0	0,88
12	2,1	9,5	0,88
13	12,6	12,1	0,88
14	14,6	13,9	0,88
15	16,1	15,4	0,88
16	15,3	15,1	0,88
17	16,9	16,1	0,88
18	17,4	16,5	0,88
19	17,9	16,8	0,88
20	18,3	13,8	0,88
21	15,3	14,3	0,88
S ₂ Laststellung II			
22	1,1	1,1	0
23	8,6	8,1	0
24	8,1	7,95	0,88
25	15,3	14,5	0,88
26	15,8	15,35	1,52
27	1,1	1,1	0
28	14,5	14,5	1,52
29	14,5	14,5	1,74
30	21,1	20,15	1,74
31	26,1	24,95	1,74
32	31,1	28,4	1,74
33	31,6	29,6	1,74

Tabelle 5 : Belastungsablauf Balken S₁ und S₂

S ₃ Laststellung I			
Last - stufe	Q _A t	Q _E t	m _q mt / m'
1	1,1	1,1	0
2	7,25	6,9	0
3	6,9	6,8	0,4
4	6,8	6,7	0,54
5	1,3	1,3	0
6	7,25	7,0	0
7	13,4	12,6	0
8	12,6	12,4	0,4
9	12,4	12,3	0,54
10	1,3	1,3	0
11	12,6	12,2	0
12	12,2	12,0	0,54
13	12,0	11,7	0,94
14	16,1	15,5	0,94
15	19,1	18,0	0,94
16	22,1	21,1	0,94
17	22,8	22,3	0,94
18	25,1	23,7	0,94
19	26,2	24,1	0,94
20	26,3	24,3	0,94
21	26,3	24,7	0,94
22	26,6	22,5	0,94
S ₃ Laststellung II			
23	1,1	1,1	0
24	13,4	12,6	0
25	12,9	12,6	0,54
26	20,5	19,8	0,54
27	19,8	19,3	0,82
28	1,2	1,2	0
29	19,85	19,7	0,82
30	19,7	19,45	0,94
31	19,45	18,85	1,43
32	24,1	23,2	1,43
33	29,1	28,05	1,43
34	33,1	30,95	1,43
35	36,1	33,9	1,43
36	38,4	33,7	1,43

S ₄ Laststellung I			
Last - stufe	Q _A t	Q _E t	m _q mt / m'
1	1,1	1,1	0
2	5,55	5,25	0
3	5,25	5,25	0,41
4	5,25	5,05	0,62
5	5,05	5,0	0,82
6	1,1	1,1	0
7	5,85	5,65	0
8	8,25	7,8	0
9	7,8	7,75	0,41
10	7,75	7,65	0,62
11	7,65	7,6	0,72
12	1,1	1,1	0
13	8,25	7,9	0
14	10,6	10,05	0
15	10,05	10,05	0,41
16	10,05	9,9	0,62
17	8,25	8,25	0,62
18	10,6	10,2	0,62
19	10,2	10,2	0,82
20	1,1	1,1	0
21	10,6	10,15	0,82
22	10,15	9,7	1,42
23	12,7	12,6	1,42
24	15,6	14,6	1,42
25	18,0	17,0	1,42
26	19,85	18,4	1,42
27	21,1	19,2	1,42
28	20,8	20,0	1,42
29	23,5	21,3	1,42
30	23,0	21,9	1,42
S ₄ Laststellung II			
31	1,1	1,1	0
32	10,6	10,1	0
33	17,1	16,1	0
34	1,1	1,1	0
35	17,1	16,9	0
36	16,9	16,9	0,82
37	16,9	16,85	1,09
38	21,1	20,2	1,09
39	25,1	24,0	1,09
40	29,1	27,6	1,09
41	32,1	30,1	1,09
42	34,1	30,35	1,09
43	33,85	29,1	1,09

Tabelle 6 : Belastungsablauf
Balken S₃ und S₄

S ₅ Laststellung I			
Last- stufe	Q _A t	Q _E t	m _q mt/m'
1	1,1	1,1	0
2	6,7	6,2	0
3	9,5	9,0	0
4	1,1	1,1	0
5	9,5	9,1	0
6	9,1	9,0	0,51
7	9,0	8,6	0,765
8	8,6	8,5	1,02
9	1,1	1,1	0
10	9,5	9,3	0
11	12,3	11,8	0
12	11,8	11,8	0,51
13	11,8	11,7	0,765
14	11,7	11,6	1,02
15	1,1	1,1	0
16	12,3	11,9	0
17	11,9	11,7	1,02
18	11,7	11,5	1,77
19	16,1	15,3	1,77
20	19,1	18,1	1,77
21	22,1	20,6	1,77
22	23,3	21,9	1,77
23	24,1	22,7	1,77
24	25,2	22,6	1,77
25	25,4	22,7	1,77
26	26,1	24,6	1,77
S ₅ Laststellung II			
27	1,1	1,1	0
28	19,8	18,35	0
29	18,35	17,75	1,02
30	1,1	1,1	0
31	19,8	19,2	0
32	19,2	19,0	1,02
33	19,0	19,0	1,35
34	24,1	23,2	1,35
35	28,1	26,75	1,35
36	32,1	30,3	1,35
37	35,1	32,25	1,35
38	36,5	32,0	1,35

Tabelle 7 : Belastungsablauf
S₅ und S₆

S ₆ Laststellung I			
Last- stufe	Q _A t	Q _E t	m _q mt/m'
1	1,1	1,1	0
2	6,7	6,0	0
3	8,55	8,05	0
4	1,1	1,1	0
5	6,7	6,5	0
6	6,5	6,5	0,405
7	6,5	6,25	0,54
8	1,1	1,1	0
9	6,7	6,55	0
10	8,55	8,25	0
11	8,25	7,95	0,405
12	7,95	7,75	0,54
13	10,1	9,4	0,54
14	11,6	11,1	0,54
15	13,15	12,5	0,54
16	14,65	13,95	0,54
17	15,6	14,8	0,54
18	16,6	15,45	0,54
19	17,25	16,15	0,54
20	18,05	16,25	0,54
21	18,1	14,5	0,54
S ₆ Laststellung II			
22	1,1	1,1	0
23	7,25	7,15	0
24	13,45	13,05	0
25	13,05	13,05	0,405
26	13,05	12,9	0,54
27	1,1	1,1	0
28	13,45	13,25	0
29	13,25	13,1	0,54
30	13,1	13,1	0,69
31	13,45	13,45	0,74
32	13,45	13,45	0,91
33	13,45	13,35	0,95
34	13,35	13,3	1,03
35	13,3	13,3	1,1
36	13,3	13,3	1,24
37	13,3	13,15	1,38
38	13,15	13,15	1,46
39	13,15	13,15	1,55
40	13,15	12,85	1,58
41	12,85	12,7	1,58

Balken	Gerechnet			Gemessen					Gerechnet		Gemessen	
	tg α	Q _u Th	Q _{zul}	Q _u ^{Ex}	Q _{fz}	Q _{fL}	Q _{fD}	m _u Th	m _{zul}			
		t	t	t	t	t	t	mt/m'	mt/m'	mt/m'	m _q	
S ₁ LS I LS II	0,94	16,55	7,76	16,6	14,57	13,93	16,38	1,17	0,55		0,83	
	0,57	41,4	19,4	34,1	—	—	31,6	1,74	0,82		0,94	
S ₂ LS I LS II	0,94	16,55	7,76	16,8	11,59	14,04	15,92	1,17	0,55		0,88	
	1,55	32,8	15,4	29,6	—	—	—	3,22	1,51		1,74	
S ₃ LS I LS II	0,6	25,7	12,05	24,7	16,17	21,9	21,63	1,17	0,55		0,94	
	0,57	41,4	19,4	33,9	—	—	33,81	1,74	0,82		1,43	
S ₄ LS I LS II	0,96	20,5	9,6	21,9	11,6	17,1	19,79	1,74	0,82		1,42	
	0,58	34,7	16,3	30,35	—	—	30,06	1,74	0,82		1,09	
S ₅ LS I LS II	0,97	24,8	11,63	24,6	17,54	19,73	24,38	2,20	1,03		1,77	
	0,58	40,0	18,77	32,25	—	—	32,24	2,20	1,03		1,35	
S ₆ LS I LS II	0,92	17,0	7,98	16,25	13,7	12,98	14,79	1,17	0,55		0,54	
	0,60	26,0	12,2	12,70*	—	—	—	1,17	0,55		1,58*	

* $Q_{\text{max}}^{\text{Ex}} = Q_{\text{zul}}$ Steigerung der Querbiegung bis Bruch

Tabelle 8 : Theoretische und gemessene Lasten

Laststellung I

Laststellung II

Bild 1 : Belastung in Längsrichtung (Masse in cm)

Bild 4 : Gesamtansicht der Versuchsanlage

Bild 5 : Bewehrungskorb

Bild 6 : Ansicht Vorderseite des Versuchsbalkens

Bild 7 : Querschnitt, Belastungseinrichtung für Querbiegung

Bild 8 : Bewehrung der Balken S₁ und S₂ (Masse in cm)

Bild 9 : Bewehrung der Balken S3 und S4 (Masse in cm)

Bild 10: Bewehrung der Balken S_5 und S_6 (Masse in cm)

Bild 11: Spannungs - Dehnungs - Diagramm eines BOX - Stahles ϕ 8 mm

Bild 12: Gemittelte Spannungs - Dehnungs - Diagramme BOX - Stahl

Bild 13: Generelles Belastungsschema

- Ⓐ : Kraft konstant während 2 Min
- Ⓑ : Durchbiegung konstant (Messung der Verformungen)

Bild 14: Schema einer Laststufe

Messstelle Nr.	Schub-bereich	Messung	Messgerät	Messstelle Nr.	Schub-bereich	Messung	Messgerät
1 - 6	I + II	Kontrolle Querbiegemoment	Dehnungs-mess-streifen	105 - 112	I	Bügeldehnung Druckseite	20cm Deform-meter
8 - 9	I + II	Kraftmessung H_0		113 - 126	I	Horizontaler Bügelabstand	
11 - 17	I	Betonstauchung		128 - 135	II	Bügeldehnung Druckseite	
18 - 24	II	Betonstauchung		136 - 149	II	Horizontaler Bügelabstand	
52-56	I + II	Durchbiegung	Messstab	151 - 163	I	Dehnung Längsbewehrung	28cm Deform-meter
59-66	I	Bügeldehnung Zugseite	20 cm Deformeter	164 - 179	II	Dehnung Längsbewehrung	
67-80	I	Horizontaler Bügelabstand		181 - 193	I+II	Betonstauchung	
82-89	II	Bügeldehnung Zugseite		196 - 223	I+II	Diagonalen Zugseite	
90-103	II	Horizontaler Bügelabstand		225 - 252	I+II	Diagonalen Druckseite	

- Stahl - Messstelle
- Beton - Messstelle
- ⊙ Durchbiegungs - Messstelle
- ▭ Dehnungsmessstreifen

Bild 15 : Messstellenplan (Schubbereich II analog)(Masse in cm)

Bügelbewehrung

Längsbewehrung

Bild 16: S_1 LS I Dehnungen der Bügel- und Längsbewehrung (Masse in cm)

Bügelbewehrung

Längsbewehrung

Bild 17: S_2 LS I Dehnungen der Bügel- und Längsbewehrung (Masse in cm)

Bügelbewehrung

Längsbewehrung

Bild 18: S₃ LS I Dehnungen der Bügel - und Längsbewehrung (Masse in cm)

Bügelbewehrung

Längsbewehrung

Bild 19: S₄ LS I Dehnungen der Bügel - und Längsbewehrung (Masse in cm)

Bügelbewehrung

- Zugseite
- - - Druckseite

Längsbewehrung

Bild 20: S_5 LS I Dehnungen der Bügel- und Längsbewehrung (Masse in cm)

Bild 21: S_6 LS I Dehnungen der Bügel- und Längsbewehrung (Masse in cm)

Bild 22: S₁ LS II Dehnungen der Bügel- und Längsbewehrung (Masse in cm)

Bild 23: S₂ LS II Dehnungen der Bügel- und Längsbewehrung (Masse in cm)

Bild 24: S₃ LS II Dehnungen der Bügel- und Längsbewehrung (Masse in cm)

Bild 25: S_4 LS II Dehnungen der Bügel- und Längsbewehrung (Masse in cm)

Bild 26: S₅ LS II Dehnungen der Bügel- und Längsbewehrung (Masse in cm)

Bild 27: S_1 Verlauf der Bügeldehnungen

Bild 28: S_1 Dehnungsverlauf der Längsbewehrung

Bild 29: S_2 Verlauf der Bügeldehnungen

Bild 30: S_2 Dehnungsverlauf der Längsbewehrung

Bild 31: S_3 Verlauf der Bügeldehnungen

Bild 32: S_3 Dehnungsverlauf der Längsbewehrung

Bild 33: S_4 Verlauf der Bügeldehnungen

Bild 34: S_4 Dehnungsverlauf der Längsbewehrung

Bild 35: S₅ Verlauf der Bügeldehnungen

Bild 36: S₅ Dehnungsverlauf der Längsbewehrung

Bild 37: S_6 Verlauf der Bügeldehnungen

Bild 38: S_6 Dehnungsverlauf der Längsbewehrung

Bild 39: S_1 Betonstauchungen

Bild 40: S_2 Betonstauchungen

Bild 41: S_3 Betonstauchungen

Bild 42: S_4 Betonstauchungen

Bild 43: S_1 Durchbiegung in Balkenmitte

Bild 44: S₂ Durchbiegung in Balkenmitte

Bild 45: S₃ Durchbiegung in Balkenmitte

Bild 46: S₄ Durchbiegung in Balkenmitte

Bild 47: S_5 Durchbiegung in Balkenmitte

Bild 48: S_1 Durchbiegung Laststellung I

Bild 49: S_1 Durchbiegung Laststellung II

Bild 50: S_2 Durchbiegung Laststellung I

Bild 51: S_2 Durchbiegung Laststellung II

Bild 52: S_3 Durchbiegung Laststellung I

Bild 53: S_3 Durchbiegung Laststellung II

Bild 54: S₄ Durchbiegung Laststellung I

Bild 55: S₄ Durchbiegung Laststellung II

Bild 56: S_5 Durchbiegung Laststellung I

Bild 57: S_5 Durchbiegung Laststellung II

Bild 58: S_6 Durchbiegung in Balkenmitte Bild 59: S_6 Durchbiegung Laststellung I

Bild 60: S₁ Schiebungen γ (Masse in cm)

Bild 61: S₂ Schiebungen γ (Masse in cm)

Bild 62: S_3 Schiebungen γ (Masse in cm)

Bild 63: S₄ Schiebungen γ (Masse in cm)

Bild 65: S₆ Schiebungen γ (Masse in cm)

Bild 66: Gemittelte Dehnungen der Bügelbewehrung in Funktion der normierten Querkraft (Laststellung I)

Bild 67: Gemittelte Dehnungen der Längsbewehrung in Funktion der normierten Querkraft (Laststellung I)

Bild 68 : Gemittelte Dehnungen der Bügel- und Längsbewehrung in Funktion der normierten Querkraft (Laststellung II)

Bild 69: S₁ LS I Gemittelte Bügeldehnungen bei kombinierter Belastung

Bild 70: S₂ LS I Gemittelte Bügeldehnungen bei kombinierter Belastung

Bild 71: S₃ LSI Gemittelte Bügeldehnungen bei kombinierter Belastung

Bild 72: S₄ LSI Gemittelte Bügeldehnungen bei kombinierter Belastung

Bild 73: S₅ LSI Gemittelte Bügeldehnungen bei kombinierter Belastung

Bild 74: S₆ LSI Gemittelte Bügeldehnungen bei kombinierter Belastung

Bild 75: S₆ LSII Gemittelte Bügeldehnungen in Funktion der Querkraft

Bild 76: S₆ LSII Gemittelte Bügeldehnungen in Funktion der Querbiegung

Bild 77 : Rissverlauf Balken S₁ Laststellung I

Bild 78 : Rissverlauf Balken S₅ Laststellung I

Bild 79: Gemittelte Rissbreiten bei kombinierter Belastung

Bild 80: Maximale Rissbreiten bei kombinierter Belastung

Druckseite LS 29

Druckseite LS 30

Druckseite nach Überschreiten der Maximallast

Bild 81 : Entwicklung eines Sprödbruches : Balken S_1 , Laststellung II

Bild 82 : Duktiler Bruch Balken S_4 Laststellung I

Bild 83 : Spröder Bruch Balken S_6 Laststellung II

Bild 84: Theoretische und gemessene Bruchlasten

Bild 85: Vergleich der nominellen Schubspannung (bei Bruch) mit der oberen Schubspannungsgrenze

Bild 86: Interaktion Schub- Querbiegung

Bild 87: Sprödbrüche bei Schub mit und ohne Querbiegung

Bild 88: Seitliche Festhaltekraft H_0 in Funktion der Querkraft

Bild 89: Krümmung des Steges in Funktion der Querkraft

Bild 90: Vorhandene Bügelkräfte in Funktion der Querkraft

Bild 91: Exzentrische Querkraft