Versuche über Längsschub, Querbiegung und Quervorspannung in Zugplatten von Betonträgern

Working Paper**Author(s):**

Bacchetta, Aldo; Bachmann, Hugo

Publication date:

1979

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000184909>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

Bericht / Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich 6504(10)

Versuche über Längsschub, Querbiegung und Quervorspannung in Zugplatten von Betonträgern

Aldo Bacchetta
Hugo Bachmann

November 1979
Bericht Nr. 6504-10

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Bacchetta, Aldo:

Versuche über Längsschub, Querbiegung und Quervorspannung in Zugplatten von Betonträgern/
von Aldo Bacchetta; Hugo Bachmann. -Basel, Boston, Stuttgart : Birkhäuser, 1979.
(Bericht/Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich ; Nr. 6504-10)

ISBN 3-7643-1153-3

NE: Bachmann, Hugo:

Nachdruck verboten.

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen und
der Reproduktion auf photostatischem Wege oder durch Mikrofilm,
vorbehalten.

© Birkhäuser Verlag Basel, 1979

ISBN 3-7643-1153-3

Versuche über Längsschub, Querbiegung und Quervorspannung in Zugplatten von Betonträgern

von

Dipl. Ing. Aldo Bacchetta

Prof. Dr. Hugo Bachmann

Institut für Baustatik und Konstruktion
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Zürich
November 1979

1. EINLEITUNG	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Bemessungsmodelle	2
1.3.1 Längsschub allein	2
1.3.2 Längsschub mit Querbiegung	3
1.3.3 Längsschub mit Querbiegung und Quervorspannung	3
1.4 Versuchsplanung	4
2. VERSUCHSTRAEGER	7
2.1 Beschreibung	7
2.1.1 Abmessungen, Armierungen	7
2.1.2 Herstellung, Vorspannung, Lagerung	7
2.2 Baustoffe	8
2.2.1 Armierungsstahl, Spannstahl	8
2.2.2 Beton	8
2.2.3 Zementmörtel	8
2.3 Bemessung und theoretische Werte	9
2.3.1 Berechnete Lasten und Schubspannungen	9
2.3.2 Längsbiegearmierung	9
2.3.3 Schubarmierung im Steg	10
2.3.4 Querarmierung in der Druckplatte	10
2.3.5 Querarmierung in der Zugplatte	10
3. VERSUCHSDURCHFUEHRUNG	12
3.1 Versuchsanlage	12
3.2 Versuchsablauf	12
3.3 Messungen	13
3.3.1 Lasten	13
3.3.2 Verformungen	13
3.3.3 Risse	14
4. VERSUCHSRESULTATE	15
4.1 Allgemeines	15
4.2 Biegeverhalten der Träger	16
4.2.1 Durchbiegungen	16
4.2.2 Stauchungen der Druckplatte	16
4.2.3 Dehnungen der Längsbiegearmierung	16
4.2.4 Dehnungen der Längsbiegearmierung beim Träger Z2	
4.3 Dehnungen der Plattenquerarmierung	17
4.3.1 Träger Z1 und Z2 (Längsschub allein)	17
4.3.2 Träger Z4 (Längsschub allein, mit Querbiegung/ und Quervorspannung	18
4.3.3 Träger Z3, Z5 und Z6 (Längsschub mit Querbiegung/ und Quervorspannung	19
4.4 Kräfte in der Plattenquerarmierung	21
4.4.1 Träger Z1 und Z2 (Längsschub allein)	21
4.4.2 Träger Z4 (Längsschub allein, mit Querbiegung/ und Quervorspannung	21
4.4.3 Träger Z3, Z5 und Z6 (Längsschub mit Querbiegung/ und Quervorspannung	22
4.5 Verlagerung des Angriffspunktes der Querkraft aus Längsschub	24
4.5.1 Längsschub allein, gleiche obere und untere Querarmierung	25
4.5.2 Längsschub allein, ungleiche obere und untere Querarmierung	25

	Seite
4.5.3 Längsschub mit Querbiegung, gleiche oder ungleiche obere und untere Armierung	25
4.6 Rissverhalten	25
4.6.1 Träger Z1 und Z2	25
4.6.2 Träger Z4	26
4.6.3 Träger Z3, Z5 und Z6	26
4.7 Bruchverhalten	27
4.7.1 Träger Z1 und Z2	27
4.7.2 Träger Z4	27
4.7.3 Träger Z3, Z5 und Z6	27
5. FOLGERUNGEN	29
5.1 Längsschub allein	29
5.1.1 Tragfähigkeit	29
5.1.2 Verhalten im Gebrauchszustand	30
5.2 Längsschub mit Querbiegung	30
5.2.1 Tragfähigkeit	30
5.2.2 Verhalten im Gebrauchszustand	30
5.3 Längsschub mit Querbiegung und Quervorspannung	30
5.3.1 Tragfähigkeit	30
5.3.2 Verhalten im Gebrauchszustand	31
ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN	32
RESUME ET RECOMMANDATIONS	34
SUMMARY AND RECOMMENDATIONS	37
VERDANKUNGEN	40
LITERATURVERZEICHNIS	41
BEZEICHNUNGEN	42
BILDER	45
ANHANG	A1

1. EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

In Druck- bzw. Zugflanschen dünnwandiger Plattenbalken- und Hohlkastenquerschnitte treten ausser Längsdruck bzw. Längszug häufig auch Längsschub und Querbiegung auf.

Die Problematik in Druckflanschen wurde in [1] und [2] sowie in [3] und [4] eingehend untersucht und behandelt.

Die Problematik in Zugflanschen ist Gegenstand des vorliegenden Versuchsberichtes. Es sollen die Grundlagen für die Entwicklung einfacher, mit der Wirklichkeit gut übereinstimmender Bemessungsmodelle bereitgestellt werden.

An einem Element des zum Beispiel als Kragarm gelagerten Plattenbalkens mit ausserhalb des Steges eingelegter Längsbiegearmierung gemäss Bild 1 können in einem Schnitt I-I, je nach der äusseren Belastung, im Rissezustand folgende Schnittgrössen auftreten:

a) Längsschub allein

Wirkt eine Belastung P in der Symmetrieebene des I-Trägers, so entsteht eine Längsschubkraft $\tau_{yx} \cdot d$.

b) Längsschub mit Querbiegung

Wirkt ferner eine Belastung $\bar{P}$ ausserhalb des Steges, so entsteht zum Längsschub hinzu ein Querbiegemoment $\bar{M}$. Die ebenfalls auftretende vertikale Schubkraft $\tau_{xy} \cdot d$ ist meist klein und wird in der vorliegenden Untersuchung nicht weiter berücksichtigt.

c) Längsschub mit Querbiegung und Quervorspannung

Ist die Zugplatte in Querrichtung vorgespannt, so wirkt ausser Längsschub und Querbiegung zusätzlich noch die Vorspannkraft V .

Zu diesen Problemkreisen wurden in den Jahren 1977 und 1978 am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich Versuche an insgesamt sechs Versuchsträgern durchgeführt. Zum Problemkreis "Längsschub allein" wurden zwei Versuchsträger und zu "Längsschub mit Querbiegung" sowie "Längsschub mit Querbiegung und Quervorspannung" vier Versuchsträger geprüft.

1.2 Zielsetzung

Die Ziele der hier beschriebenen Versuche waren:

- die Erforschung des Verformungs- und Tragverhaltens von Zugplatten von Betonträgern unter Längsschub, Querbiegung und Quervorspannung, und
- das Entwickeln und Ueberprüfen neuer Bemessungsmodelle anhand der Versuchsergebnisse, wobei zwei wesentliche Anforderungen an ein Modell gestellt wurden:
 1. Das Modell soll möglichst gut mit der Wirklichkeit übereinstimmen.
 2. Das Modell soll zu einem möglichst geringen Rechenaufwand führen.

1.3 Bemessungsmodelle

1.3.1 Längsschub allein

Im Falle von Längsschub werden in der Praxis die Beanspruchungen im Anschlussbereich Zugplatte - Steg normalerweise nach dem klassischen Modell (Hauptzugsspannungs-Modell) ermittelt. Wie sich bereits bei den Druckflansch-Versuchen herausgestellt hat, stimmt dieses Modell im Risszustand mit der Wirklichkeit schlecht überein.

Zweckmässiger ist beim Zugflansch ein Flanschfachwerk-Modell, ähnlich demjenigen für den Druckflansch ([1] und [2]). Die Grundidee dieses Flanschfachwerk-Modells vermittelt Bild 2a. Wird die Wirkung des Trägersteges durch ein Fachwerk mit der Höhe des inneren Hebelarms z und der Diagonalenneigung α erfasst, so greifen an der Platte im Abstand $z \cdot \cot \alpha$ die horizontalen Komponenten der Stegdiagonalenkräfte D an, das heisst $D \cdot \cos \alpha = Q \cdot \cot \alpha$. Diese müssen sich im Risszustand bei ausserhalb des Steges liegender Längsbiegearmierung in den Flanschen ausbreiten. Ersetzt man die in den beiden Flanschhälften liegende Längsbiegearmierung je in ihrem Schwerpunkt durch einen Zugstab, und ergänzt man die beiden Zugstäbe durch Stabdreiecke zur Kraftausbreitung, so entsteht ein einfaches Flanschfachwerk. Im Abstand $z \cdot \cot \alpha$ ergeben sich Querkzugkräfte

$$Z_1 = \frac{Q}{2} \cdot \cot \alpha \cdot \tan \beta \quad , \quad (1)$$

welche die Zugplatte im Anschluss Platte - Steg auf Querkzug beanspruchen.

Wird dieses diskrete Fachwerk "verschmiert", so beträgt die Querkzugkraft Z pro Längeneinheit

$$Z = \frac{Q}{2 \cdot z} \cdot \tan \beta \quad . \quad (2)$$

Das Versatzmass v der Querarmierung, bezogen auf den Trägerquerschnitt mit der Querkraft Q , beträgt

$$v = \frac{Z}{2} \cdot \cot \alpha + \frac{b}{2} \cdot \cot \beta \quad (3)$$

in Richtung des abnehmenden Biegemomentes.

Wird nur ein Teil, F_{eL}^{F1} , der gesamten Längsbiegearmierung F_{eL} ausserhalb des Steges in den Flanschen angeordnet und der Rest über dem Steg, so kann das Flanschfachwerk-Modell gemäss Bild 2b durch einen Zugstab in der Stegebene ergänzt werden. In diesem Fall muss sich nur noch derjenige Teil der horizontalen Komponente der Stegdiagonalkraft D , welcher dem Verhältnis F_{eL}^{F1}/F_{eL} entspricht, in die beiden Flanschhälften ausbreiten.

Die durch eine Querarmierung aufzunehmende Zugkraft pro Längeneinheit wird

$$Z = \frac{Q}{2 \cdot z} \cdot \frac{F_{eL}^{F1}}{F_{eL}} \cdot \tan \beta \quad . \quad (4)$$

Die Armierung kann je zur Hälfte oben und unten in die Platte eingelegt werden (Bild 3 oben). Den beiden Lagen entsprechen die Kräfte

$$K_o = \frac{Z}{2} \quad ; \quad K_u = \frac{Z}{2} \quad . \quad (5)$$

1.3.2 Längsschub mit Querbiegung

Für den Fall "Längsschub mit Querbiegung" kann, sofern das unbefriedigende Hauptzugspannungs-Modell ausser acht gelassen wird, die Plattenquerarmierung grundsätzlich nach einem der folgenden drei Modelle bestimmt werden (Bild 3):

a) Ueberlagerung der Armierungen aus zentrisch angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung

Die Armierung für die Querkzugkraft Z wird nach dem Flanschfachwerk-Modell gemäss Gl. (4) ermittelt und je zur Hälfte oben und unten in der Platte vorgesehen. Die Armierung für das Querbiegemoment $\bar{M}$ wird gemäss der normalen Biegetheorie bestimmt und der Armierung für Längsschub überlagert. Es braucht also eine obere (Querbiegezugseite) und eine untere (Querbiegedruckseite) Plattenquerarmierung. Diese Armierungen entsprechen den folgenden Kräften:

$$K_o = \frac{Z}{2} + \frac{\bar{M}}{z_p} \quad ; \quad K_u = \frac{Z}{2} \quad . \quad (6)$$

b) Ueberlagerung der Kräfte aus zentrisch angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung

Die zentrisch angreifende Querkzugkraft Z nach Flanschfachwerk-Modell gemäss Gl. (4) und das Querbiegemoment $\bar{M}$ werden als gemeinsam wirkende Querschnittsbeanspruchung betrachtet. Im Vergleich zum Modell a) bedeutet dies im wesentlichen, dass auf der Querbiegedruckseite die Druckkraft aus dem Querbiegemoment berücksichtigt wird.

$$K_o = \frac{Z}{2} + \frac{\bar{M}}{z_p} \quad ; \quad K_u = \frac{Z}{2} - \frac{\bar{M}}{z_p} \quad . \quad (7)$$

Demgemäss wird im Querschnitt meist, d.h. bei genügend grossem Querbiegemoment $\bar{M}$, auf der Querbiegedruckseite keine Querarmierung benötigt.

c) Ueberlagerung der Kräfte aus exzentrisch angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung

Die mit der Exzentrizität e gegen die Querbiegedruckzone hin angreifende Querkzugkraft Z nach Flanschfachwerk-Modell gemäss Gl. (4) und das Querbiegemoment $\bar{M}$ werden als gemeinsam wirkende Querschnittsbeanspruchung betrachtet.

$$K_o = \frac{Z}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot e}{z_p}\right) + \frac{\bar{M}}{z_p} \quad ; \quad K_u = \frac{Z}{2} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot e}{z_p}\right) - \frac{\bar{M}}{z_p} \quad . \quad (8)$$

Im Vergleich zum Modell b) bedeutet dies eine Verminderung der Beanspruchung auf der Querbiegezugseite, währenddem auf der Querbiegedruckseite, bei genügend grossem Querbiegemoment $\bar{M}$, meist ebenfalls keine Querarmierung benötigt wird.

1.3.3 Längsschub mit Querbiegung und Quervorspannung

Für den Fall "Längsschub mit Querbiegung und Quervorspannung" kann ähnlich vorgegangen werden wie beim Fall "Längsschub mit Querbiegung".

Bei den Druckflansch-Untersuchungen ([2] und [4]) wurde bestätigt, dass bei einer plastischen Bemessung die vorgespannte Armierung wie eine schlaffe Armierung behandelt werden kann, natürlich unter Berücksichtigung der viel höheren Fließ- bzw. Streckgrenze. Dieses Vorgehen ist auch beim Zugflansch anwendbar.

1.4 Versuchsplanung

Um das Verformungs- und Tragverhalten von Zugflanschen von Betonträgern unter Längsschub, Querbiegung und Quervorspannung zu erforschen sowie die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Modelle zu überprüfen, wurde ein Versuchsprogramm ausgearbeitet. Dieses sah die Prüfung von sechs Versuchsträgern, Z1 bis Z6, vor. Die ersten zwei Träger, Z1 und Z2, wurden dem Problemkreis "Längsschub allein" zugeordnet. Bei den anderen vier Trägern, Z3 bis Z6, wurde je die eine Trägerhälfte dem Problemkreis "Längsschub mit Querbiegung" und die andere Trägerhälfte dem Problemkreis "Längsschub mit Querbiegung und Quervorspannung" gewidmet.

Die Belastungsanordnung der sechs Versuchsträger ist in Bild 10 dargestellt. Bei allen Trägern waren die Abmessungen, die Betonqualität und die Stegarmierung gleich gehalten; sie sind in Bild 5 ersichtlich.

Die Längsbiegearmierung der Träger wurde je zur Hälfte in beiden Flanschhälften angeordnet, mit Ausnahme des Trägers Z2. Bei diesem Träger wurden nur 75% der Längsbiegearmierung im Flansch und 25% über dem Steg eingelegt.

Für die Planung und Bemessung der Versuchsträger wurde im Flanschfachwerk-Modell mit der Querkraft gemäss Gl. (4) der Ausbreitwinkel β zu 33° angenommen, was

$$\tan\beta = 0.66 \quad (9)$$

entspricht.

Für das Versatzmass v der Querarmierung, bezogen auf den Querschnitt mit der Querkraft Q , gemäss Gl. (3), wurde für α , entsprechend den steilen Druckdiagonalen beim Zwischenauf-lager, $\approx 60^\circ$ und für $\beta \approx 30^\circ$ eingesetzt. Damit ergibt sich gerundet

$$v \approx 0.3 \cdot (z + 2 \cdot b_g) \quad (10)$$

Die Plattenquerarmierungen wurden nach den in Bild 3 dargestellten Modellen bemessen. Bild 4 zeigt die entsprechenden Fliesskräfte der eingelegten Querarmierungen. Dort, wo nach Modell keine oder nur eine schwache Querarmierung erforderlich gewesen wäre, wurde stets eine konstruktive Mindestarmierung eingelegt.

Im einzelnen wurde die rechnerisch ermittelte Plattenquerarmierung wie folgt konzipiert:

Träger Z1 (Längsschub allein)

Die Plattenquerarmierung wurde nach dem Flanschfachwerk-Modell gemäss den Gleichungen (4) und (9) bestimmt und im allgemeinen um das Versatzmass v gemäss Gl. (10) in Richtung des abnehmenden Biegemomentes verschoben je zur Hälfte oben und unten in die Platte eingelegt.

Auf der linken Seite des Trägers wurde jedoch das Versatzmass v am Trägerende etwa um 30% (ca. 12.5 cm) verkürzt und die Plattenquerarmierung am Ende entsprechend zusammengesoben. Das Gesamtvolumen der Plattenquerarmierung wurde somit, im Vergleich zur rechten Seite des Trägers, nicht verändert.

Träger Z2 (Längsschub allein)

Die Plattenquerarmierung wurde auch bei diesem Träger grundsätzlich nach dem Flanschfachwerk-Modell gemäss den Gleichungen (4), (9) und (10) bestimmt. Weil jedoch nur 75% der Längsbiegearmierung im Flansch und 25% über dem Steg angeordnet wurden, betrug die er-

forderliche Fliesskraft der Querarmierung nur 75% derjenigen des Trägers Z1. Diese Armierung wurde auf der rechten Seite des Trägers eingelegt. Auf der linken Seite wurden 30% mehr Querarmierung, d.h. wie bei Z1, angeordnet.

Träger Z3 (Längsschub mit Querbiegung/ und Quervorspannung)

Die Plattenquerarmierung dieses Trägers wurde nach dem Modell "Ueberlagerung der Armierungen aus zentrisch angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung" bemessen. Die Querkzugkraft Z wurde nach dem Flanschfachwerk-Modell gemäss den Gleichungen (4), (9) und (10) berechnet.

Auf der rechten Seite des Trägers wurde die Zugplatte in Querrichtung teilweise vorgespannt, d.h. es wurde auf der oberen Seite (Querbiegezugseite) eine gemischte (schlaaffe und vorgespannte) Querarmierung angeordnet.

Träger Z4 (Längsschub allein, mit Querbiegung/ und Quervorspannung)

Die Plattenarmierung dieses Trägers wurde nach dem Modell "Ueberlagerung der Kräfte aus exzentrisch angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung" bemessen. Die Querkzugkraft Z wurde nach dem Flanschfachwerk-Modell gemäss den Gleichungen (4), (9) und (10) berechnet. Für die Exzentrizität e (zur Querbiege-Druckzone hin) wurde der "Extremwert" $z_p/2$ gewählt. Als Unterschied zu den Trägern Z3, Z5 und Z6 wurde die Querbiegung um ca. 50% erhöht, wodurch die unten (auf der Querbiegedruckseite) angreifende Druckkraft aus der Querbiegung $\bar{M}/z_p$ gleich gross war wie die (als dort angreifend angenommene) Querkzugkraft Z , d.h. die Kraft K_u gemäss Gl. (8) war null. Daher wurde auf der Querbiegedruckseite nur die Mindestarmierung eingelegt. Von dieser Mindestarmierung abgesehen, war die Zugplatte des Trägers Z4 sozusagen nur auf Querbiegung armiert (obere Lage).

Träger Z5 (Längsschub mit Querbiegung/ und Quervorspannung)

Die Plattenquerarmierung dieses Trägers wurde nach dem Modell "Ueberlagerung der Kräfte aus zentrisch angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung" bemessen. Die Querkzugkraft Z wurde auch hier nach dem Flanschfachwerk-Modell gemäss den Gleichungen (4), (9) und (10) berechnet. Als Unterschied zum Träger Z3 wurde gemäss Gl. (7) unten (auf der Querbiegedruckseite) die Biegedruckkraft aus der Querbiegung $\bar{M}/z_p$ in Abzug gebracht. Hier war die Biegedruckkraft ca. 33% grösser als der untere Querkzugkraft-Anteil $Z/2$.

Auch bei diesem Träger wurde die Platte auf der rechten Seite teilweise vorgespannt.

Träger Z6 (Längsschub mit Querbiegung/ und Quervorspannung)

Die Plattenquerarmierung dieses Trägers wurde nach dem Modell "Ueberlagerung der Kräfte aus exzentrisch angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung" bemessen. Die Querkzugkraft Z wurde wiederum nach dem Flanschfachwerk-Modell gemäss den Gleichungen (4), (9) und (10) berechnet. Für die Exzentrizität e (gegen die Querbiegedruckzone hin) wurde der "Mittelwert" $z_p/4$ gewählt. Die unten (auf der Querbiegedruckseite) angreifende Druckkraft aus der Querbiegung $\bar{M}/z_p$ betrug nur ca. 89% des unteren Querkzugkraft-Anteils $3 \cdot Z/4$. Die somit noch resultierende, verhältnismässig kleine Zugkraft K_u gemäss Gl. (8) war durch die Mindestarmierung reichlich abgedeckt.

Auch bei diesem Träger wurde die Platte auf der rechten Seite teilweise vorgespannt.

Die Quervorspannung der Zugflanschen auf der rechten Seite der Träger Z3 bis Z6 wurde konstant längs der Trägerhälften aufgebracht. Ihre Grösse wurde so gewählt, dass in den Bereichen III "Reine Querbiegung" (Bild 4b) das Fliesskraftverhältnis

$$\lambda = \frac{F_s \cdot \sigma_{sf}}{F_e \cdot \sigma_{ef} + F_s \cdot \sigma_{sf}} \quad (11)$$

0.6 betrug. Dies entspricht einer häufig anzutreffenden Quervorspannung von Brückenfahrbahnplatten.

Für das Verhalten von teilweise vorgespannten Konstruktionen im Gebrauchszustand ist der Vorspanngrad

$$\kappa' = \frac{M_{zul,V}}{M_{g+p}} \quad (12)$$

von wesentlicher Bedeutung. Der Vorspanngrad κ' gibt an, bei welchem Teil des Gebrauchslastmomentes am ungerissenen Querschnitt die Randzugspannung σ_r auftritt. Er wird in Tabelle 7 für reine Biegung ($\gamma = 0$) und für Biegung mit zentrischem Zug ($\gamma > 0$) näher definiert.

Vor allem die Randzugspannung σ_r , aber auch das Zugkraft-Momenten-Verhältnis

$$\gamma = \frac{Z}{M/d}$$

haben einen wesentlichen Einfluss auf den Vorspanngrad. Dies zeigt auch Tabelle 7, wo die Zusammenhänge für den Anschnitt Zugplatte - Steg der Versuchsträger Z3, Z5 und Z6 dargestellt sind. Nach der Norm SIA 162 [5] beträgt die zulässige Randspannung σ_r bei voller Vorspannung 10 (bis 20) kg/cm².

Bei den Versuchsträgern Z3, Z5 und Z6 betrug der Vorspanngrad bei der Bemessungsflusslast für $\sigma_r = 10$ kg/cm² in den Bereichen III "Reine Querbiegung" ($\gamma = 0$) 0.68 und im Bereich IV "Längsschub mit Querbiegung" ($\gamma \approx 1.8$) 0.52.

2. VERSUCHSTRÄGER

2.1 Beschreibung

2.1.1 Abmessungen, Armierungen

Die Abmessungen und Armierungen gehen aus den Bildern 5 und 6 hervor.

Abmessungen

Die Betonabmessungen waren bei allen sechs Trägern gleich. Die Träger waren 616 cm lang und 63 cm hoch, der Steg 20 cm breit und die Flanschen 100 cm breit. Die Dicke der Druckplatte betrug am Rand 10 cm und beim Steg 15 cm, diejenige der Zugplatte 10 cm.

Längsbiegearmierung

Die Längsbiegearmierung war mit Ausnahme von Z2 bei allen sechs Trägern gleich. Sie bestand aus der Hauptarmierung, 8 Stäbe $\varnothing$ 26 mm, und aus den konstruktiv erforderlichen Stäben 2 $\varnothing$ 8 mm und 4 $\varnothing$ 6 mm. Beim Träger Z2 wurden 2 der 8 Stäbe $\varnothing$ 26 mm über dem Steg angeordnet anstelle der 2 Stäbe $\varnothing$ 8 mm. Sämtliche Stäbe der Hauptarmierung wurden mit stumpf angeschweissten Endplatten verankert.

Schubarmierung im Steg

Die Schubarmierung im Steg war bei allen sechs Trägern gleich. Sie bestand in den Querkraftbereichen aus Bügeln $\varnothing$ 12 mm im Abstand $t = 12.5$ cm und ausserhalb derselben aus Bügeln $\varnothing$ 8 mm im Abstand $t = 25$ cm.

Querarmierung in der Druckplatte

Die nach den entsprechenden Modellen unter Berücksichtigung des Versatzmasses (siehe [1] und [3]) bemessene Querarmierung in der Druckplatte bestand in den Längsschubbereichen und ausserhalb derselben aus Bügeln $\varnothing$ 6 mm im Abstand $t = 25$ cm.

Querarmierung in der Zugplatte

Die schlaffe Querarmierung in der Zugplatte bestand aus Armierungsstäben $\varnothing$ 6 mm und $\varnothing$ 8 mm, die in zwei Lagen, d.h. oben und unten, eingelegt wurden. Die genaue Anordnung der Plattenarmierung ist aus Bild 6 ersichtlich.

Als vorgespannte Plattenquerarmierung wurden bei den Trägern Z3, Z5 und Z6 Spanndrähte $\varnothing$ 4 mm im Abstand $t = 20$ cm und beim Träger Z4 Spanndrähte $\varnothing$ 4 mm im Abstand $t = 13.3$ cm eingelegt. Um einen einwandfreien Verbund sicherzustellen und nicht ein kleines Hüllrohr injizieren zu müssen, wurde folgende Lösung gewählt (Bild 7): Beim Betonieren wurden in der Zugplatte kanalförmige, d.h. oben offene, Aussparungen angebracht. In diese konnten die Spanndrähte eingelegt werden. Nach dem Vorspannen wurden die Aussparungen mit erdfeuchtem Zementmörtel ausgefüllt, bzw. ausgestopft.

Die Vorspannkkräfte, entsprechend einer Spannung $\sigma_{sv}(t=0) = 0.7 \beta_{zd}$, wurden mit einem Dynamometer gemessen. Der Spannungsabfall infolge von Schwinden, Kriechen und Relaxation wurde bis zum Prüftag zu 10% (wie in [2] und [4]) angenommen.

2.1.2 Herstellung, Vorspannung, Lagerung

Die Herstellung der sechs Versuchsträger, Z1 bis Z6, erfolgte in einer Holzschalung. Der Beton wurde mit einem Nadelvibrator verdichtet. Fünf Tage nach dem Betonieren wurden die Träger ausgeschalt. Im Alter von 28 Tagen wurden die Vorspanndrähte angebracht und vorgespannt. Anschliessend erfolgte das oben beschriebene Injizieren. Bis zur Prüfung im Alter von 56 Tagen wurden die Träger im Betoniererraum gelagert, wo sie für die Prüfung vorbereitet wurden.

2.2 Baustoffe

2.2.1 Armierungsstahl, Spannstahl

Die gesamte schlaffe Armierung bestand aus naturhartem Stahl (BOX-ULTRA) mit Ausnahme der Querarmierungsstäbe $\varnothing$ 6 mm im Zugflansch. Diese Armierungsstäbe bestanden aus kaltverformtem Stahl (TOR), der aber durch eine spezielle Wärmebehandlung im Werk wieder eine ausgeprägte Fließgrenze erhalten hatte.

Die vorgespannte Querarmierung der Zugplatte bestand aus patentiert kaltgezogenen Spanndrähten $\varnothing$ 4 mm (Stahlton AG).

Die Kennwerte (Mittelwerte) der verwendeten Stähle sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Sie wurden in einer dehnungsgesteuerten Zugmaschine ermittelt (wie bei [1] und [2]). Dabei wurde die Dehnungsgeschwindigkeit auf 1.25% pro Minute festgelegt. Im Fließbereich und bei der Höchstlast wurde die Dehnungsgeschwindigkeit gleich null gesetzt. Während einer Wartezeit von zwei Minuten fiel der sogenannte dynamische Festigkeitswert (σ_{fd} bzw. β_{zd}) auf den statischen Wert (σ_{fs} bzw. β_{zs}) ab. Wartezeiten länger als zwei Minuten haben praktisch keinen Einfluss auf die statischen Festigkeitswerte.

Die gemittelten idealisierten σ - ϵ -Diagramme der Querarmierung für die Zugplatte sind in Bild 8 dargestellt.

2.2.2 Beton

Die Zusammensetzung des Frischbetons war für alle sechs Träger gleich und ist in Tabelle 2 angegeben. Der Zuschlagstoff, der aus gut gewaschenem und getrocknetem Material bestand, wurde getrennt nach drei Komponenten beigegeben. Die Siebkurve der Mischung entsprach ungefähr der Fuller-Kurve. Als Bindemittel wurde normaler Portlandzement verwendet.

Zur Bestimmung der konventionellen Betonfestigkeitswerte Würfeldruckfestigkeit β_w , Prismendruckfestigkeit β_p , Biegezugfestigkeit β_{bz} und Querkzugfestigkeit β_{qz} wurden Würfel (15 x 15 x 15 cm), Prismen (12 x 12 x 36 cm) und Zylinder ($\varnothing$ 10 cm, h = 30 cm) hergestellt und geprüft. Die Mittelwerte dieser im Alter von 28 Tagen geprüften Proben sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Für die Ermittlung des σ - ϵ -Diagramms des Betons wurden Prüfzylinder verwendet. Um den Einfluss der Dehnungsgeschwindigkeit demjenigen der Balkenversuche anzupassen, wurde eine verhältnismässig geringe Dehnungsgeschwindigkeit von etwa 0.07% pro Minute gewählt. Das Ergebnis ist in Tabelle 4 und in Bild 9 dargestellt.

2.2.3 Zementmörtel

Die Zusammensetzung des für die "Injektion" der Spanndrähte verwendeten frischen Zementmörtels ist in Tabelle 5 angegeben.

Zur Ermittlung der konventionellen Mörtelfestigkeitswerte β_p und β_{bz} wurden kleine Prismen (4 x 4 x 16 cm) hergestellt und geprüft. Die Mittelwerte dieser im Alter von 28 Tagen geprüften Proben sind aus Tabelle 6 ersichtlich.

2.3 Bemessung und theoretische Werte

2.3.1 Berechnete Lasten und Schubspannungen

Der Bemessung der Träger wurden die mit den effektiven Materialkennwerten berechneten theoretischen Last- und Schnittkraftgrößen zugrunde gelegt.

In Tabelle 8 sind die Längsbelastung P_{uB}^{Th} für die theoretische Biegekapazität der Träger (Biegefließlast) sowie die Längs- und Querbeltung P_f^{Th} und $\bar{P}_f^{Th}$ für den theoretischen Fließbeginn der Zugplattenquerarmierung (Bemessungsfließlasten) aufgeführt. Die Bemessungsfließlast P_f^{Th} wurde, mit Ausnahme der linken Seite von Z2, auf etwa 70% der Biegefließlast P_{uB}^{Th} festgelegt.

Ebenfalls in Tabelle 8 aufgeführt sind die nominellen Schubspannungen τ_s , τ_{yx} und τ_{yz} , die sich unter diesen Lasten im Steg bzw. im Anschnitt Zugplatte - Steg ergeben. Sie wurden wie folgt definiert:

- Nominelle Schubspannung im Steg:

$$\tau_s = \frac{Q}{b \cdot z} = \frac{P_{uB}^{Th}}{b \cdot z} \quad (13)$$

wobei: z = innerer Hebelarm des Trägers (50 cm)

- Nominelle Längsschubspannung im Anschnitt Zugplatte - Steg:

$$\tau_{yx} = \frac{Q}{2 \cdot d \cdot z} \cdot \frac{F_{eL}^{Fl}}{F_{eL}} = \frac{P_f^{Th}}{2 \cdot d \cdot z} \cdot \frac{F_{eL}^{Fl}}{F_{eL}} \quad (14)$$

wobei: F_{eL}^{Fl} = Längsbiegearmierung im Flansch
 F_{eL} = gesamte Längsbiegearmierung

- Nominelle Querschubspannung im Anschnitt Zugplatte - Steg:

$$\tau_{yz} = \frac{\bar{P}_f^{Th}}{l \cdot z_p} \quad (15)$$

wobei: l = Abstand der Querbeltung $\bar{P}$ (88 cm)
 z_p = innerer Hebelarm der Zugplatte (8.2 cm)

Eine Längsbelastung P_f^{Th} von 43 t erzeugt im Anschnitt Zugplatte - Steg eine nominelle Längsschubspannung τ_{yx} von 43 kg/cm² bzw. 32 kg/cm² beim Träger Z2. Die bei den vorliegenden Versuchen nicht weiter berücksichtigte Querschubspannung τ_{yz} infolge einer Querbeltung $\bar{P}_f^{Th}$ von 3.9 t, bzw. 6.0 t beim Träger Z4, betrug 5.4 kg/cm² bzw. 8.3 kg/cm².

2.3.2 Längsbiegearmierung

Die Längsbiegearmierung wurde für die angestrebte Biegefließlast P_{uB}^{Th} nach den Regeln der plastischen Bemessung bestimmt. Dabei wurde für den Stahl der Mittelwert der dynamischen Fließspannung $\sigma_{fd} = 5.2$ t/cm² und für den Beton der Mittelwert der konventionell ermittelten Würfeldruckfestigkeit $\beta_{w28} = 375$ kg/cm² eingesetzt. Der Längsbiegearmierungsgehalt μ_L betrug 0.78%.

2.3.3 Schubarmierung im Steg

Die Schubarmierung im Steg wurde ebenfalls auf die BiegeflieSSLast P_{UB}^{Th} ausgelegt. Um das Risiko eines vorzeitigen Schubbruchs zu eliminieren, wurde die Bemessung der Bügel nach der Richtlinie 34 der Norm SIA 162 mit $\tan \alpha \approx 0.7$ durchgeführt. In den Bereichen ohne Querkraft wurde eine minimale Bügelarmierung eingelegt. Der Schubarmierungsgehalt im Steg μ_B betrug 0.9% bzw. 0.2% in den Bereichen ohne Querkraft.

2.3.4 Querarmierung in der Druckplatte

Die Querarmierung in der Druckplatte wurde ebenfalls auf die BiegeflieSSLast P_{UB}^{Th} ausgelegt. Die Bemessung erfolgte nach dem entsprechenden Flanschfachwerk-Modell für den Druckflansch (siehe [1] und [3]).

Der Querarmierungsgehalt in der Druckplatte (obere und untere Armierung zusammen) betrug 0.3% bzw. 0.15% in den Bereichen, für welche das Modell keine Armierung vorschreibt.

2.3.5 Querarmierung in der Zugplatte

Träger Z1 und Z2 (Längsschub allein)

Die Querarmierung in den Zugplatten der Träger Z1 und Z2 wurde auf die BemessungsflieSSLast $P_f^{Th} = 43 \text{ t}$ ausgelegt, mit Ausnahme der linken Trägerhälfte des Trägers Z2, für welche entsprechend der um 30% vergrösserten Querarmierung (siehe Abschnitt 1.4 und Bild 4a) eine BemessungsflieSSLast von 56 t angesetzt wurde.

Die Zugplatten dieser beiden Versuchsträger können aufgrund des Flanschfachwerk-Modells in zwei verschieden beanspruchte Bereiche aufgeteilt werden (Bild 4a):

- Bereich I : "Keine Querbeanspruchung"
- Bereich II: "Längsschub allein"

Im Bereich I "Keine Querbeanspruchung" wurden die Zugplatten beider Träger mit einer zweilagigen konstruktiven Mindestarmierung versehen ($\mu_{min} = 0.12\%$ pro Lage).

Im Bereich II "Längsschub allein" wurde die Plattenquerarmierung nach dem Flanschfachwerk-Modell gemäss den Gleichungen (4) und (9) bemessen und je zur Hälfte oben und unten in die Zugplatte eingelegt. Der Armierungsgehalt pro Lage betrug beim Träger Z1 $\mu = 0.32\%$ und beim Träger Z2 $\mu = 0.25\%$ in der rechten Trägerhälfte, bzw. ebenfalls $\mu = 0.32\%$ in der linken Trägerhälfte.

Träger Z3 bis Z6 (Längsschub mit Querbiegung/ und Quervorspannung)

Der Bemessung der Querarmierung in der Zugplatte der Träger Z3, Z5 und Z6 wurden die FlieSSLasten $P_f^{Th} = 43 \text{ t}$ und $\bar{P}_f^{Th} = 3.9 \text{ t}$ zugrunde gelegt. Beim Träger Z4 wurde die BemessungsflieSSLast $\bar{P}_f^{Th}$ auf 6.0 t ($\bar{M}/z_p \approx Z$) angesetzt.

Die Zugplatten dieser vier Versuchsträger können ebenfalls in zwei verschieden beanspruchte Bereiche aufgeteilt werden (Bild 4b):

- Bereich III: "Reine Querbiegung"
- Bereich IV : "Längsschub mit Querbiegung"

Bei allen vier Versuchsträgern wurden zudem die Zugplatten in der rechten Trägerhälfte in Querrichtung teilweise vorgespannt.

Im Bereich III "Reine Querbiegung" wurde die Querarmierung allein auf die BemessungsflieSSLast $\bar{P}_f^{Th} = 3.9 \text{ t}$, bzw. 6.0 t beim Träger Z4 ausgelegt. Die im Abstand von 44 cm längs den Plattenrändern wirkende Querbelastung $\bar{P}_f^{Th}/2$ (Bild 10) ergab im Anschnitt Zugplatte - Steg ein Querbiegemoment $\bar{M}$ von 1.46 mt/m', bzw. 2.24 mt/m' beim Träger Z4.

Die Armierungen wurden nach den üblichen Regeln der plastischen Bemessung bestimmt und oben (auf der Querbiegezugseite) in der Platte eingelegt. Der Anteil der vorgespannten Querarmierung (auf der rechten Trägerseite) kann durch das Fliesskraft-Verhältnis λ beschrieben werden (siehe Abschnitt 1.4). Es betrug bei allen vier Versuchsträgern im Bereich III etwa 0.6. Die entsprechenden Vorspanngrade κ' sind für die Träger Z3, Z5 und Z6 in Tabelle 7 eingetragen (reine Biegung, $\gamma = 0$).

Der absolute Armierungsgehalt der oberen Querarmierung $\mu = (F_e + F_s)/b \cdot h_p$ betrug 0.38% in den schlaff armierten Trägerhälften und 0.22% in den teilweise vorgespannten Trägerhälften, bzw. 0.59% und 0.34% beim Träger Z4. In der unteren Lage wurde auch hier eine konstruktive Mindestarmierung ($\mu_{\min} = 0.12\%$) angeordnet.

Im Bereich IV „Längsschub mit Querbiegung“ wurde die Querarmierung auf die Bemessungsfliesslasten $P_f^{Th} = 43 \text{ t}$ und $\bar{P}_f^{Th} = 3.9 \text{ t}$, bzw. 6.0 t beim Träger Z4, ausgelegt. Dabei wurde von den Beanspruchungen im Anschnitt Zugplatte - Steg gemäss den in Abschnitt 1.3 dargestellten Modellen ausgegangen.

In den teilweise vorgespannten Zugplatten (rechte Trägerhälften) wurde die im Bereich III mit dem Fliesskraftverhältnis $\lambda = 0.6$ bestimmte und oben eingelegte Vorspannarmierung konstant auch über den Bereich IV durchgeführt und mit der erforderlichen schlaffen Armierung ergänzt. Die entsprechenden Vorspanngrade κ' der Versuchsträger Z3, Z5 und Z6 bei den Bemessungsfliesslasten P_f^{Th} , $\bar{P}_f^{Th}$ sind in der Tabelle 7 eingetragen ($\gamma = 1.8$).

Der absolute Armierungsgehalt der oberen Querarmierung $\mu = (F_e + F_s)/b \cdot h_p$ schwankte in den nur schlaff armierten Trägerhälften zwischen 0.53% beim Träger Z6 und 0.69% bei den Trägern Z3 und Z5. In den teilweise vorgespannten Trägerhälften betrug er 0.37% beim Träger Z6 und 0.51% bei den Trägern Z3 und Z5. In der unteren Lage, wo gemäss Modell keine Armierung vorgesehen ist, wurde eine konstruktive Mindestarmierung ($\mu_{\min} = 0.12\%$) eingelegt.

3. VERSUCHSDURCHFUEHRUNG

3.1 Versuchsanlage

Die Versuchsträger Z1 bis Z6 wurden auf dem neuen Aufspannboden der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich auf dem Hänggerberg geprüft. Bild 11 zeigt die Versuchsanlage für die Träger Z1 und Z2 und Bild 12 diejenige für die Träger Z3 bis Z6. Es wurden insgesamt zwei Arten von Belastungen aufgebracht (vgl. Bild 10):

- Die "Längsbelastung" P wurde durch zwei 100 t Pressen erzeugt. Um während des Versuchs eine symmetrische und zwängungsfreie Verschiebung der beiden Trägersauflager zu gewährleisten, wurden die dortigen blockierbaren Rollenlager abwechselungsweise gelöst bzw. blockiert.
- Die "Querbeltung" $\bar{P}$ wurde durch sieben kleine Pressen (~ 15 t) im Abstand $l = 88$ cm aufgebracht, welche an eine zweite unabhängige Pumpanlage angeschlossen waren. Jeder Kolben zieht die Zugplatte mit der Kraft $2 \times \bar{P}$ nach unten, wobei die Reaktion dieser Kraft von unten auf den Steg des Trägers abgegeben wird. Die Querbeltung $\bar{P}$ bildet zusammen mit den entsprechenden Reaktionen einen Eigenspannungszustand und verursacht somit in Längsrichtung des Trägers keine zusätzlichen Beanspruchungen und somit auch keine zusätzlichen Längsschubspannungen τ_{yx} . Abgesehen von den versuchstechnischen Vorteilen dieser Belastungsanordnung wird damit auch ein direkter Vergleich zwischen aufgebrachter Belastung P bzw. $\bar{P}$ und Beanspruchung in der Zugplatte ermöglicht. Um beim Anschnitt Zugplatte - Steg längs des Trägers ein möglichst gleichmässiges Querbiegemoment $\bar{M}$ zu erzeugen, wurden die Angriffspunkte der Zugkräfte $\bar{P}$ am Zugplattenrand durch kleine Lastverteilträger (HEB 100) verdoppelt.

3.2 Versuchsablauf

Bei jeder Laststufe kam das übliche Belastungsschema zur Anwendung, nämlich:

- Verändern der Last innerhalb von etwa zwei Minuten bis zum Erreichen der vorgesehenen Last- bzw. Verformungsgrösse. Ablesen der Anfangslast P_A bzw. $\bar{P}_A$.
- Konstanthalten der Anfangslast P_A bzw. $\bar{P}_A$ während zwei Minuten.
- Konstanthalten einer Deformationsgrösse für die Dauer der Messungen (ca. 45 Minuten); entsprechende Reduktion der Last (Relaxation). Nach Beendigung der Messungen Ablesen der Endlast P_E bzw. $\bar{P}_E$.

In der dritten Phase wurden als Deformationsgrössen für die Längsbelastung P jeweils die Durchbiegung unter der Lasteintragung und für die Querbeltung $\bar{P}$ die relative Durchbiegung des Zugplattenrandes gegenüber dem Steg in Trägersmitte (Bereich III: "Reine Querbiegung") konstant gehalten.

Es wurden folgende charakteristische Lastgrössen definiert:

$$\begin{array}{ll}
 P_I = P_f^{Th}/1.8 = 24 \text{ t}, & \bar{P}_I = \bar{P}_f^{Th}/1.8 = 2.15 \text{ t} \quad (3.3 \text{ t bei Z4}) \\
 P_{II} = P_f^{Th}/1.3 = 33 \text{ t}, & \bar{P}_{II} = \bar{P}_f^{Th}/1.3 = 3.00 \text{ t} \quad (4.6 \text{ t bei Z4}) \\
 P_{III} = P_f^{Th} = 43 \text{ t}, & \bar{P}_{III} = \bar{P}_f^{Th} = 3.90 \text{ t} \quad (6.0 \text{ t bei Z4})
 \end{array}$$

Der Belastungsablauf der Versuchsträger ist in den Bildern 13, 14 und 15 aufgezeichnet. Die Lasten der einzelnen Laststufen sind aus den Tabellen 9 bis 14 ersichtlich.

Die Träger Z1 und Z2 wurden nur einer Längsbelastung P unterworfen (Bild 13).

Beim Träger Z4 (Querarmierung nur in der oberen Lage - abgesehen von der Mindestarmierung in der unteren Lage) wurde zuerst mit der Längsbelastung P bis auf P_{III} gefahren (Bild 14). Von da an wurde die Längsbelastung P konstant gehalten bzw. nach jeder Laststufe wieder auf die Anfangslast $P_A = P_{III}$ erhöht und die Querbeltung $\bar{P}$ stufenweise ($\bar{P}_I$, $\bar{P}_{II}$ und $\bar{P}_{III}$) bis zum Bruch vergrößert.

Bei den Trägern Z3, Z5 und Z6 hingegen (Bild 15) wurde zuerst die Querbeltung $\bar{P}$ auf eine charakteristische Lastgrösse ($\bar{P}_I$ bzw. $\bar{P}_{II}$ bzw. $\bar{P}_{III}$) vorgezogen. Anschliessend wurde mit der Längsbelastung P auf die entsprechende Lastgrösse (P_I bzw. P_{II} bzw. P_{III}) nachgefahren. Von P_{III} , $\bar{P}_{III}$ an wurde die Querbeltung $\bar{P}$ konstant gehalten bzw. nach jeder Laststufe wieder auf die Anfangslast $\bar{P}_A = \bar{P}_{III}$ erhöht und nur die Längsbelastung P bis zum Bruch weiter vergrößert.

3.3 Messungen

3.3.1 Lasten

Die in den Versuchsträgern wirksamen Schnittkräfte wurden aus den gemessenen Lasten P und $\bar{P}$ ermittelt. Die Längsbelastung P wurde durch zwei Druckmessdosen direkt bei der Krafteinleitung unter den Pressen erfasst. Die Querbeltung $\bar{P}$ konnte am geeichten Pendelmanometer abgelesen werden.

3.3.2 Verformungen

Es wurden folgende Verformungsmessungen durchgeführt:

Durchbiegungen

Die Durchbiegungen der Versuchsträger (Bild 16) wurden mittels fest installierter induktiver Weggeber zwischen Hallenboden und Unterkante Versuchsträger gemessen (Anzeige in 5/1000 mm).

Stauchungen der Druckplatte

Mit einem elektronischen Deformeter von 20 cm Basislänge (Anzeige in 1/1000 mm) wurden auf der unteren Seite der Druckplatte die Betonstauchungen in Längsrichtung entlang des Trägers gemessen (Bild 16).

Dehnungen der Längsbiegearmierung

Mit einem elektronischen Deformeter von 20 cm Basislänge (Anzeige in 1/1000 mm) wurden jeweils die Dehnungen eines Stabes der Längsbiegearmierung in der oberen Lage entlang der ganzen Zugplatte gemessen (Bild 17). Beim Versuchsträger Z2 wurden die Dehnungen zweier Armierungsstäbe (einer im Flansch und einer über dem Steg) entlang einer Trägerhälfte gemessen (Bild 18).

Dehnungen der Querarmierung in der Zugplatte

Mit einem elektronischen Deformeter von 10 cm Basislänge (Anzeige in 1/1000 mm) wurden die Dehnungen der schlaffen oberen Plattenquerarmierung an fünf Messstrecken pro Armierungsstab gemessen. An der unteren Plattenquerarmierung wurden die Dehnungen an zwei Messstrecken pro Armierungsstab gemessen (siehe z.B. Bild 19b oben).

Die Deformeter wurden auf Messbolzen gesetzt, die mit einem Schnellklebestoff auf den freiliegenden Stahl bzw. auf die Betonfläche geklebt waren. Mit diesem Verfahren konnten die Messungen bis zum Bruch einwandfrei vorgenommen werden.

Bei der Auswertung der Dehnungsmessungen der Plattenquerarmierung wurde ferner der Einfluss der Plattenkrümmung infolge von Querbiegung auf die Messwerte "auskorrigiert" (Bild 46). Die an der oberen bzw. unteren Plattenquerarmierung ermittelten Dehnungen ϵ_o und ϵ_u wurden nicht in der Mittellinie der Armierungsstäbe gemessen, sondern auf der Höhe des Messbolzens. Die effektiven Stabdehnungen ϵ_{eo} bzw. ϵ_{eu} wurden anhand der "gemessenen" Dehnungsebene (ϵ_o , ϵ_u) bestimmt.

Ferner wurde für die Umrechnung der Dehnungen auf Spannungen folgender Effekt berücksichtigt: Mit einem Deformeter wird eine Längenänderung Δl der Basislänge l_o gemessen. Bildet man den Quotienten $\Delta l/l_o$, so erhält man eine mittlere Dehnung ϵ_{em} über diese Basislänge. Vor allem beim Stahl ergeben sich aber im gerissenen Zustand Abweichungen zwischen einer mittleren Dehnung ϵ_{em} und der maximalen Dehnung $\epsilon_{e,max}$ im Riss. Für die Umsetzung der mittleren Dehnung ϵ_{em} in die Spannungen bzw. Kräfte im Rissquerschnitt (anhand von σ - ϵ -Diagrammen) wurde ein mittlerer Koeffizient $\kappa = \epsilon_{em}/\epsilon_{e,max}$ von 0.9 angenommen.

Eine Begründung dieser Annahme wird aufgrund entsprechender Versuche in [1] gegeben. Der Koeffizient $\kappa = 0.9$ entspricht am besten der Wirklichkeit bei Dehnungen um die Fließgrenze (ϵ_{ef}). Sowohl bei kleineren als auch bei grösseren Dehnungen (ϵ_e) nimmt κ oft kleinere Werte an.

3.3.3 Risse

Nach jeder Laststufe wurden die in der Zugplatte von blossen Auge sichtbaren Risse mit Filzstift nachgezogen und die Rissbreiten mit einem Rissemassstab ausgemessen (Einschätzung auf 0.05 mm). Die Rissbreiten wurden auf Klebern notiert und diese neben den Rissen fixiert. Anschliessend wurden das Rissbild und damit auch die Rissbreiten fotografisch festgehalten (Bilder 31 bis 40).

4. VERSUCHSRESULTATE

4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Resultate der sechs untersuchten Versuchsträger dargestellt. Vorerst seien jedoch die wichtigsten Aspekte aus den vorangegangenen Kapiteln kurz wiederholt:

Zur Erzeugung des Längsschubes τ_{yx} wurden die Träger Z1 bis Z6 der "Längsbelastung" P unterworfen. Zur Erzeugung des Querbiegemomentes $\bar{M}$ wurden die Träger Z3 bis Z6 zusätzlich noch der "Querbeltung" $\bar{P}$ (Eigenspannungszustand) unterworfen (Bild 10). Bei den Versuchsträgern Z3 bis Z6 wurde zudem auf der rechten Hälfte die Zugplatte in Querrichtung teilweise vorgespannt. Somit wurden die Zugplatten der Träger Z1 und Z2 im Anschnitt Zugplatte - Steg durch "Längsschub allein", die Träger Z3 bis Z6 auf der linken Hälfte durch "Längsschub mit Querbeltung" und auf der rechten Hälfte durch "Längsschub mit Querbeltung und Quervorspannung" beansprucht.

Mit Ausnahme des Versuchsträgers Z2 wurde die gesamte Längsbiegearmierung in die beiden Zugflanschhälften, d.h. ausserhalb des Steges, verlegt. Bei dem Träger Z2 wurden je 37.5% der Längsbiegearmierung in die Flanschhälften und 25% über dem Steg angeordnet. Bei allen Trägern wurde die Plattenquerarmierung für die Längsschubbeanspruchung nach dem Flanschfachwerk-Modell (Bild 2) konzipiert und gemäss den Gleichungen (4), (9) und (10) bemessen. Wie im Abschnitt 1.4 ausführlich beschrieben wurde und in den Bildern 3 und 4 dargestellt ist, sind folgende Merkmale wesentlich:

Beim Träger Z1 wurde auf der linken Seite die Zugplatte um 12.5 cm "verkürzt", bzw. die Querarmierung am Trägerende zusammengeschoben.

Beim Träger Z2 waren 25% der Längsbiegearmierung über dem Steg angeordnet. Auf der linken Seite wurden 30% mehr Querarmierung (um 30% erhöhte Bemessungsfliesslant) als auf der rechten Seite eingelegt.

Beim Träger Z3 wurde die Plattenquerarmierung nach dem Modell "Ueberlagerung der Armiertungen aus zentrisch angreifender Quertugkraft und aus Querbeltung" eingelegt.

Beim Träger Z4 wurde die Plattenquerarmierung nach dem Modell "Ueberlagerung der Kräfte aus exzentrisch mit $e = z_p/2$ angreifender Quertugkraft und aus Querbeltung" eingelegt.

Beim Träger Z5 wurde die Plattenquerarmierung nach dem Modell "Ueberlagerung der Kräfte aus zentrisch angreifender Quertugkraft und aus Querbeltung" eingelegt.

Beim Träger Z6 wurde die Plattenquerarmierung nach dem Modell "Ueberlagerung der Kräfte aus exzentrisch mit $e = z_p/4$ angreifender Quertugkraft und aus Querbeltung" eingelegt.

Für die Darstellung der Versuchsergebnisse wurden folgende charakteristische Lastgrössen bzw. Lastkombinationen gewählt:

- Gebrauchslast der Plattenquerarmierung (1. Stufe):

$$P_I = P_{III}/1.8$$

$$\bar{P}_I = \bar{P}_{III}/1.8$$

- Laststufe zwischen Gebrauchslast und Bemessungsfliesslant der Plattenquerarmierung (2. Stufe):

$$P_{II} = P_{III}/1.3$$

$$\bar{P}_{II} = \bar{P}_{III}/1.3$$

- Bemessungsfließlast der Plattenquerarmierung (3. Stufe):

$$P_{III} = P_f^{Th}$$

$$\bar{P}_{III} = \bar{P}_f^{Th}$$

- Laststufen über der Bemessungsfließlast:

$$P > P_{III}$$

Eine Besonderheit betrifft den Träger Z2: Hier wurden für die Darstellung der Versuchsergebnisse der linken Trägerhälfte die Laststufen entsprechend der Bemessungsfließlast der rechten Trägerhälfte verwendet.

4.2 Biegeverhalten der Träger

Da bei den Versuchsträgern (Ausnahme: Träger Z2) die gleiche Längsbiegearmierung eingelegt wurde, wiesen alle Träger ein ähnliches Biegeverhalten auf. Als Beispiel wurde das Biegeverhalten des Trägers Z5 dargestellt.

4.2.1 Durchbiegungen

Bild 16 zeigt den Verlauf der Stegdurchbiegungen δ_s . Es konnten nur relativ kleine Durchbiegungen festgestellt werden, da die zweilagige Längsbiegearmierung (ausgenommen beim Träger Z2) nie vollständig ins Fließen kam.

4.2.2 Stauchungen der Druckplatte

Der Verlauf der Betonstauchungen ϵ_b , auf der unteren Seite der Druckplatte in Flanschmitte gemessen, ist ebenfalls in Bild 16 dargestellt. Es ist deutlich ersichtlich, dass der Verlauf der Betonstauchungen (bzw. Druckkräfte) im Vergleich zum Verlauf des Biegemomentes gegen die Trägermitte hin verschoben ist. Das Versatzmass beträgt hier $v = z/2 \cdot \cot \alpha$.

4.2.3 Dehnungen der Längsbiegearmierung

Die an einem oberen Armierungsstab gemessenen Stahldehnungen sind in Bild 17 festgehalten. Der Verlauf der Dehnungen (bzw. Zugkräfte) ist, im Vergleich zum Verlauf des Biegemomentes, gegen das Trägerende hin verschoben. Bei im Flansch angeordneter Längsbiegearmierung setzt sich das Versatzmass aus zwei Anteilen zusammen (vgl. Bild 2)

$$v = z/2 \cdot \cot \alpha + b_e/2 \cdot \cot \beta$$

4.2.4 Dehnungen der Längsbiegearmierung beim Träger Z2

Beim Träger Z2 (75% der Längsarmierung in den Flanschen und 25% über dem Steg) wurden die Stahldehnungen längs einer Trägerhälfte sowohl an einem oberen Armierungsstab im Flansch (äusserer Stab) als auch an einem Armierungsstab über dem Steg (innerer Stab) gemessen und in Bild 18 dargestellt. Interessant ist, dass gegen das Trägerende hin (etwa im Bereich des Schnittes A am äusseren Stab die grösseren Dehnungen gemessen wurden; d.h. der Verlauf der Dehnungen (bzw. Zugkräfte) ist, im Vergleich zum Verlauf der Dehnungen am inneren Stab, mehr gegen das Trägerende hin verschoben (in Übereinstimmung mit dem Flanschfachwerk-Modell). Beim inneren Stab (über dem Steg) beträgt das Versatzmass nur $v = z/2 \cdot \cot \alpha$; beim äusseren Stab (im Flansch) setzt sich das Versatzmass aus zwei Anteilen zusammen, nämlich $v = z/2 \cdot \cot \alpha + b_e/2 \cdot \cot \beta$. Gegen die Trägermitte hin (etwa ab Schnitt B) entzogen sich jedoch die äusseren Armierungsstäbe der Beanspruchung zulasten der inneren Stäbe.

4.3 Dehnungen der Plattenquerarmierung

Die Dehnungen der Plattenquerarmierung der Versuchsträger Z1 bis Z6, die für die Erreichung der Ziele der Untersuchung eine wichtige Rolle spielten, sind in den Bildern 19 bis 24 dargestellt. Die eingetragene Markierung "Fliesen" wurde jeweils mit $\kappa \cdot \epsilon_f$ berechnet ($\kappa = 0.9$).

4.3.1 Träger Z1 und Z2 (Längsschub allein)

Träger Z1

In Bild 19a ist die jeweils grösste Dehnung aus den fünf Messstrecken eines oberen Armierungsstabes sowie aus den zwei Messstrecken eines unteren Armierungsstabes aufgezeichnet.

Im Bereich II "Längsschub allein" ist erwartungsgemäss eine Zunahme der Dehnungen mit steigender Last P festzustellen. Bis zur BemessungsflieSSLast $P_{III} = 43 \text{ t}$ kamen nur vereinzelte Armierungsstäbe an den äusseren Enden der Bereiche II ins Fliesen und zwar sowohl in der oberen als auch in der unteren Armierungslage. Die Dehnungen in der zusammengeschobenen Querarmierung auf der linken Seite ("verkürzte" Zugplatte) waren grösser als auf der rechten Seite. Eine Laststeigerung auf $P = 49 \text{ t}$ bewirkte bereits das Fliesen von etwa der Hälfte aller Armierungsstäbe. Die zusammengeschobene Querarmierung kam schon bei der BemessungsflieSSLast P_{III} ins Fliesen.

Im mittleren Bereich I "Keine Querbeanspruchung" blieben die gemessenen Dehnungen bis zur Höchstlast gering. Nur im Uebergangsbereich I bis II konnte mit steigender Last ein etwas grösserer Dehnungszuwachs festgestellt werden, der aber vor allem auf die "Verträglichkeitswirkung" der Flanschhälften (Scheiben) zurückzuführen ist.

In Bild 19b oben ist für die beiden Schnitte A-A und B-B (Bereich II, siehe Bild 19a) die Dehnungsverteilung quer zum Träger aufgetragen. Obwohl nach der Theorie (Flanschfachwerk-Modell) die Dehnungen in allen Messstrecken pro Armierungsstab und Laststufe etwa gleich sein sollten, sind relativ grosse Unterschiede festzustellen. Die Erklärung dafür ist in der unregelmässigen (willkürlichen) Rissbildung und den entsprechend variierenden gemessenen mittleren Dehnungen zu suchen.

In Bild 19b unten ist der Verlauf der maximalen Stahldehnungen in Abhängigkeit der Last P in der oberen und unteren Lage der Schnitte A-A und B-B aufgetragen. Die Dehnungen in der oberen und unteren Armierungslage waren nahezu gleich, was zeigt, dass das Anordnen einer zweilagigen Armierung (50% oben und 50% unten) zweckmässig und gerechtfertigt ist.

Träger Z2

In Bild 20a ist die jeweils grösste Dehnung aus den fünf Messstrecken eines oberen Armierungsstabes sowie aus den zwei Messstrecken eines unteren Armierungsstabes aufgezeichnet.

Im Bereich II "Längsschub allein" resultierten auf der rechten Seite im Mittel etwas geringere maximale Dehnungen als beim Träger Z1 (bei Z2 nur 75% der Längsbiegearmierung im Flansch bzw. Querarmierung von Z1). Erst bei einer Last von $P = 56 \text{ t}$ kam die Querarmierung fast über den ganzen Bereich II ins Fliesen. Die etwas geringere Querbeanspruchung (im Vergleich mit Träger Z1) lässt sich vor allem dadurch erklären, dass sich die äussere Längsarmierung (für den Längsschub massgebend) mit steigender Belastung der Beanspruchung zulasten der inneren Längsarmierung entzieht (Bild 18).

Auf der linken Seite wiesen die maximalen Dehnungen (bei 30% mehr Armierung) erwartungsgemäss wesentlich kleinere Werte auf. Die der eingelegten Querarmierung entsprechende theoretische FlieSSLast betrug $1.3 \cdot P_{III} = 56 \text{ t}$. Bei dieser Last kamen (wie auf der rechten Seite und wie beim Träger Z1) unter P_{III} einige Armierungsstäbe am äusseren Ende des

Bereiches II ins Fließen.

Im mittleren Bereich I "Keine Querbeanspruchung" blieben die gemessenen Dehnungen bis zur Höchstlast auch bei diesem Träger klein. Der beim Uebergangsbereich I bis II festgestellte Dehnungszuwachs lässt sich vor allem mit der "Verträglichkeitwirkung" der Flanschhälften (Scheiben) erklären.

Bild 20b oben zeigt die Dehnungsverteilung quer zum Träger im Schnitt B_1-B_1 der linken Trägerhälfte und im Schnitt B_R-B_R der rechten Trägerhälfte. Wie beim Träger Z1 wiesen die Dehnungen längs eines Armierungsstabes relativ grosse Unterschiede auf, die durch die unregelmässige Rissbildung verursacht wurden.

Bild 20b unten zeigt den Verlauf der maximalen Stahldehnungen in Abhängigkeit der Last P in der oberen und unteren Lage der Schnitte B_1-B_1 und B_R-B_R . Die Dehnungen in der oberen und unteren Armierungslage waren fast gleich. Deutlich ist die geringere Dehnungszunahme im Schnitt B_1-B_1 zu sehen (30% mehr Armierung).

4.3.2 Träger Z4 (Längsschub allein, mit Querbiegung/ und Quervorspannung)

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, wurde als Variante zu den Trägern Z3, Z5 und Z6 beim Träger Z4 zuerst mit der Längsbelastung P bis P_{III} gefahren und erst darnach die Querbelerastung $\bar{P}$ stufenweise erhöht.

In Bild 21a ist die jeweils grösste Dehnung aus den fünf Messstrecken eines oberen schlaffen Armierungsstabes aufgezeichnet. Die Dehnungen der ersten drei dargestellten Laststufen (nur Längsbelastung P) wiesen einen ähnlichen Verlauf auf wie bei den Trägern Z1 und Z2, obwohl die obere Querarmierung konstant über die ganze Zugplatte durchgezogen wurde. Durch das Aufbringen der Querbelerastung $\bar{P}$ glichen sich die Dehnungen mit mittleren Bereich III "Reine Querbiegung" denjenigen im Bereich IV "Längsschub mit Querbiegung" etwas an.

In Bild 21b oben ist für die beiden Schnitte B_1-B_1 und B_R-B_R im Bereich IV die Dehnungsverteilung der oberen Armierungslage quer zum Träger aufgetragen (B_1 : schlaff armierte Seite; B_R : teilweise vorgespannte Seite).

In Bild 21b unten ist der Verlauf der maximalen Stahldehnungen in Abhängigkeit der Last P in den Schnitten B_1-B_1 und B_R-B_R aufgetragen.

In Bild 21c sind die jeweils grössten Dehnungen aus den beiden äusseren Messstrecken a-a eines oberen schlaffen Armierungsstabes sowie aus den zwei Messstrecken eines unteren Armierungsstabes aufgezeichnet. Im mittleren Bereich III blieben die Dehnungen der unteren Armierungslage bei jeder Last fast null. Im Bereich IV hingegen nahmen sie mit steigender Längsbelastung P zu, um darauf mit steigender Querbelerastung $\bar{P}$ (infolge Querbiegedruckkraft) wieder abzunehmen.

In Bild 21d ist der Verlauf der maximalen Stahldehnungen in Abhängigkeit der Last P der äusseren Messstrecken a-a in den Schnitten B_1-B_1 und B_R-B_R für die obere und untere Lage dargestellt.

4.3.3 Träger Z3, Z5 und Z6 (Längsschub mit Querbiegung/ und Quervorspannung)

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, wurde bei den Versuchsträgern Z3, Z5 und Z6 zuerst die Querb Belastung $\bar{P}$ um eine Stufe vorgefahren, mit der Längsbelastung P nachgefahren und nach der dritten Stufe (P_{III} , $\bar{P}_{III}$) nur noch mit der Längsbelastung P bis zum Bruch weitergefahren. Die Träger Z5 und Z6 wiesen im Gegensatz zum Träger Z3 als untere Plattenquerarmierung nur eine konstruktive Mindestarmierung auf.

Träger Z3

In Bild 22a ist die jeweils grösste Dehnung aus den fünf Messstrecken eines oberen schlaffen Armierungsstabes aufgezeichnet. Ausser den ersten beiden dargestellten Laststufen (P_I , $\bar{P}_I$ und P_{II} , $\bar{P}_{II}$) wiesen die anderen vier Laststufen die gleiche Querb Belastung $\bar{P}_{III}$ auf, währenddem die Längsbelastung P von P_{II} auf $P = 54$ t gesteigert wurde. Im Bereich IV "Längsschub mit Querbiegung" kam die Querarmierung auf der linken Seite (schlaff armiert) bei der Bemessungsfließlast P_{III} , $\bar{P}_{III}$ und auf der rechten Seite (teilweise vorgespannt) erst bei der Laststufe $P = 54$ t, $\bar{P}_{III}$ teilweise ins Fließen. Im mittleren Bereich III "Reine Querbiegung" kam die Querarmierung bereits unter P_{II} , $\bar{P}_{III}$ ins Fließen.

Im Bild 22b oben ist für die beiden Schnitte B_1-B_1 und B_R-B_R im Bereich IV die Dehnungsverteilung der oberen Armierungslage quer zum Träger aufgetragen (B_1 : schlaff armierte Seite; B_R : teilweise vorgespannte Seite). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Dehnungen im Schnitt B_R-B_R im Vergleich zu denjenigen im Schnitt B_1-B_1 zuerst wesentlich geringer waren, sich dann aber mit steigender Belastung immer mehr angleichen.

Dieselbe Beobachtung ist auch in Bild 22b unten zu machen, wo der Verlauf der maximalen Stahldehnungen in Abhängigkeit der Last P in den Schnitten B_1-B_1 und B_R-B_R aufgetragen ist.

In Bild 22c sind die jeweils grössten Dehnungen aus den beiden äusseren Messstrecken a-a eines oberen schlaffen Armierungsstabes sowie aus den beiden Messstrecken eines unteren Armierungsstabes aufgezeichnet. Die vier dargestellten Laststufen wiesen alle die gleiche Querb Belastung $\bar{P}_{III}$ auf, währenddem die Längsbelastung P von P_{II} auf $P = 54$ t gesteigert wurde. Im mittleren Bereich III blieben die Dehnungen der unteren Armierungslage sehr gering; im Bereich IV hingegen nahmen sie mit steigender Längsbelastung zu.

In Bild 22d ist der Verlauf der maximalen Stahldehnungen in Abhängigkeit der Last P der äusseren Messstrecken a-a in den Schnitten B_1-B_1 und B_R-B_R dargestellt.

Träger Z5

In Bild 23a ist die jeweils grösste Dehnung aus den fünf Messstrecken eines oberen schlaffen Armierungsstabes aufgetragen. Ausser den ersten beiden dargestellten Laststufen (P_I , $\bar{P}_I$ und P_{II} , $\bar{P}_{II}$) wiesen die anderen vier Laststufen die gleiche Querb Belastung $\bar{P}_{III}$ auf, währenddem die Längsbelastung P von P_{II} auf $P = 54$ t gesteigert wurde. Im Bereich IV "Längsschub mit Querbiegung" kam die Querarmierung auf der linken Seite (schlaff armiert) bei der Bemessungsfließlast P_{III} , $\bar{P}_{III}$ und auf der rechten Seite (teilweise vorgespannt) bei der Laststufe $P = 49$ t, $\bar{P}_{III}$ ins Fließen. Im mittleren Bereich III "Reine Querbiegung" kam die Querarmierung bereits unter P_{II} , $\bar{P}_{III}$ ins Fließen.

In Bild 23b oben ist für die beiden Schnitte B_1-B_1 und B_R-B_R im Bereich IV die Dehnungsverteilung der oberen Armierungslage quer zum Träger aufgetragen (B_1 : schlaff armierte Seite; B_R : teilweise vorgespannte Seite).

In Bild 23b unten ist der Verlauf der maximalen Stahldehnungen in Abhängigkeit der Last P in den Schnitten B_1-B_1 und B_R-B_R aufgetragen. Auch hier ist deutlich zu sehen, dass die Dehnungen im Schnitt B_R-B_R zuerst geringer sind, sich dann aber mit steigender Belastung denjenigen des Schnittes B_1-B_1 angleichen.

In Bild 23c sind die jeweils grössten Dehnungen aus den beiden äusseren Messstrecken a-a eines oberen schlaffen Armierungsstabes sowie aus den zwei Messstrecken eines unteren Armierungsstabes aufgezeichnet. Die vier dargestellten Laststufen wiesen alle die gleiche Querbelastrung $\bar{P}_{III}$ auf, währenddem die Längsbelastrung P von P_{II} auf $P = 54$ t gesteigert wurde. Im Bereich IV waren die Dehnungen der unteren Armierungslage im Vergleich zu denjenigen des Trägers Z3 etwas grösser, ohne jedoch (bis $P = 54$ t, $\bar{P}_{III}$) zu fliessen.

In Bild 23d ist der Verlauf der maximalen Stahldehnungen in Abhängigkeit der Last P der äusseren Messstrecken a-a in den Schnitten B_1-B_1 und B_r-B_r dargestellt.

Träger Z6

In Bild 24a ist die jeweils grösste Dehnung aus den fünf Messstrecken eines oberen schlaffen Armierungsstabes aufgezeichnet. Ausser den ersten beiden Laststufen (P_I , $\bar{P}_I$ und P_{II} , $\bar{P}_{II}$) wiesen die anderen vier Laststufen die gleiche Querbelastrung $\bar{P}_{III}$ auf, währenddem die Längsbelastrung P von P_{II} auf $P = 54$ t gesteigert wurde. Im Bereich IV "Längsschub mit Querbiegung" kam die Querarmierung der linken Seite (schlaff armiert) schon bei der Laststufe P_{II} , $\bar{P}_{III}$ und auf der rechten Seite (teilweise vorgespannt) bei der Bemessungsfliesslant P_{III} , $\bar{P}_{III}$ ins Fliessen. Obwohl bei der Bemessungsfliesslant (P_{III} , $\bar{P}_{III}$) praktisch die ganze obere Plattenquerarmierung die Fliesslant erreicht hatte, konnte die Längsbelastrung P dennoch weiter erhöht werden, was auf eine Umlagerung der Querkraft Z (aus Flanschfachwerk-Modell) gegen die Querbiegedruckzone hin schliessen lässt.

In Bild 24b oben ist für die beiden Schnitte B_1-B_1 und B_r-B_r im Bereich IV die Dehnungsverteilung der oberen Armierungslage quer zum Träger aufgetragen.

In Bild 24b unten ist der Verlauf der maximalen Stahldehnungen in Abhängigkeit der Last P in den beiden Schnitten B_1-B_1 und B_r-B_r aufgetragen.

In Bild 24c sind die jeweils grössten Dehnungen aus den zwei äusseren Messstrecken a-a eines oberen schlaffen Armierungsstabes sowie aus den zwei Messstrecken eines unteren Armierungsstabes aufgezeichnet. Die vier dargestellten Laststufen wiesen alle die gleiche Querbelastrung $\bar{P}_{III}$ auf, währenddem die Längsbelastrung P von P_{II} auf $P = 54$ t gesteigert wurde. Die oberen Armierungsstäbe kamen auch in den äusseren Messreihen a-a zum grössten Teil schon bei der Bemessungsfliesslant (P_{III} , $\bar{P}_{III}$) ins Fliessen. Im Bereich IV fielen die Dehnungen der unteren Armierungslage im Vergleich zu denjenigen des Trägers Z5 wesentlich grösser aus. Bei der letzten Laststufe $\bar{P}_{III}$ kamen auch die unteren Armierungsstäbe im Bereich IV zum grössten Teil ins Fliessen.

In Bild 24d ist der Verlauf der maximalen Stahldehnungen in Abhängigkeit der Last P der äusseren Messstrecken a-a in den Schnitten B_1-B_1 und B_r-B_r dargestellt. Auch hier (wie bei den Trägern Z3 und Z5) glichen sich die Dehnungen im Schnitt B_r-B_r (teilweise vorgespannte Seite) mit steigender Belastung denjenigen im Schnitt B_1-B_1 (schlaff armierte Seite) an.

4.4 Kräfte in der Plattenquerarmierung

4.4.1 Träger Z1 und Z2 (Längsschub allein)

Der Verlauf der Querkzugkräfte K_o in der oberen Plattenquerarmierung ist in den Bildern 25 und 26 dargestellt. Auch hier sieht man deutlich, dass der Bereich II "Längsschub allein" im Vergleich zum Querschnitt mit der Querkraft Q um das Versatzmass v (gemäss Gl. (10)) verschoben ist. In denselben Bildern sind die Last-Querkzugkraft-Diagramme ($K = K_o + K_u$; Kräfte in der oberen und unteren Lage zusammen) des Schnittes B_r-B_r (Z1) bzw. der Schnitte B_l-B_l und B_r-B_r (Z2) aufgezeichnet und mit theoretischen Werten nach Flanschfachwerk-Modell gemäss Gl. (4) verglichen. Bei allen drei Diagrammen entsprechen die "gemessenen" Werte K bei hohen Laststufen ($P \geq P_{III}$) der Querkzugkraft Z nach dem Flanschfachwerk-Modell mit einem Ausbreitwinkel β von $\tan\beta = 0.5$ bis 0.6 . Bei kleinen Laststufen ($P < P_{III}$) entsprechen die Werte K sogar einem Ausbreitwinkel β von nur $\tan\beta \approx 0.4$.

Diese Feststellungen gelten sowohl für den Fall bei dem die Längsbiegearmierung hauptsächlich in den Flanschen angeordnet war (Träger Z1, Bild 25) als auch für denjenigen, wo nur ein Teil (F_{el}^{Fl}/F_{el}) in den Flanschen und der Rest über dem Steg angeordnet war (Träger Z2, Bild 26). Die gemachten Feststellungen gelten aber auch unabhängig von der Menge der eingelegten Plattenquerarmierung (linke und rechte Seite des Trägers Z2, Bild 26), zumindest in dem hier variierten Rahmen.

4.4.2 Träger Z4 (Längsschub allein, mit Querbiegung/ und Quervorspannung)

Längsschub allein

In Bild 27a oben ist der Verlauf der "gemessenen" Querkzugkraft K_o in der oberen Plattenquerarmierung unter der Längsbelastung P_I , P_{II} und P_{III} aufgetragen.

In Bild 27a unten sind die Last-Querkzugkraft-Diagramme in den beiden Schnitten B_l-B_l und B_r-B_r aufgezeichnet und mit theoretischen Werten nach Flanschfachwerk-Modell gemäss Gl. (4) verglichen.

Weil die Plattenquerarmierung hauptsächlich in der oberen Lage eingelegt war, musste bei diesem Träger die Querkzugkraft grösstenteils von der oberen Querarmierung aufgenommen werden. Auch hier nähern sich mit steigender Last die "gemessenen" Werte K den theoretischen Werten an.

Längsschub mit Querbiegung

In Bild 27b oben ist der Verlauf der "gemessenen" Querkzugkräfte (bzw. Querdrukkräfte) K_o und K_u in den Messstrecken a-a der oberen und unteren Querarmierung bei Laststufe P_{III} , $\bar{P}_I$ aufgetragen. Dort, wo die untere Querarmierung gedrückt war, wurde die entsprechende Druckkraft des Betons mitberücksichtigt.

Um aus K_o und K_u die nur durch die Längsbelastung P bewirkte Querkzugkraft im Flansch zu ermitteln, d.h. um die Wirkung der Querb Belastung $\bar{P}$ zu eliminieren, wurde wie folgt vorgegangen:

Von der "gemessenen" Armierungskraft K_o wurde die im Schnitt a-a (gemäss Bild 47) theoretisch ermittelte Querbiege-Zugkraft $m_z = \bar{M}/z_p + \bar{Q}/2 \cdot \tan\alpha$ abgezogen bzw. der "gemessenen" Kraft K_u wurde die theoretisch ermittelte Querbiege-Druckkraft $m_D = \bar{M}/z_p - \bar{Q}/2 \cdot \tan\alpha$ dazugezählt. Damit ergaben sich die neuen Kräfte $Z_o = K_o - m_z$ und $Z_u = K_u + m_D$, deren Verlauf in Bild 27b dargestellt ist. Die Summe dieser Kräfte ergibt schliesslich die allein durch die Längsbelastung P bewirkte und in Bild 27b ebenfalls eingetragene Querkzugkraft $Z = Z_o + Z_u$. Die theoretisch ermittelte Querbiege-Zugkraft bzw. Querbiege-Druckkraft im Schnitt a-a wurde unter Berücksichtigung der Neigung der Betondruckdiagona-

len $\alpha \approx 45^\circ$ in der Platte für $\bar{Q}$ bestimmt.

In Bild 27b unten sind die derart ermittelten Kräfte Z_o , Z_u sowie deren Summe Z der Messstrecken a-a in den beiden Schnitten B_1-B_1 und B_R-B_R für die konstante Längsbelastung P_{III} in Abhängigkeit von der Last $\bar{P}$ aufgezeichnet sowie mit theoretischen Werten nach Flanschfachwerk-Modell gemäss Gl. (4) verglichen. Obwohl die Querbelastung $\bar{P}$ bis fast zur Laststufe P_{III} , $\bar{P}_{III}$ gesteigert werden konnte, konnten die entsprechenden Messungen nicht mehr vorgenommen werden. Diese Werte sind in beiden Diagrammen trotzdem eingetragen. Sie wurden aufgrund der (zutreffenden) Annahme, dass die obere und untere Querarmierung ins Fließen kam, berechnet.

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Querbelastung $\bar{P}$ der untere Querkraft-Anteil Z_u zunimmt, währenddem der obere Querkraft-Anteil Z_o abnimmt. Dies deutet auf eine Verlagerung des Angriffspunktes der Querkraft Z aus dem oberen Teil der Platte (für $\bar{P} = 0$) in die Mitte der Platte (für $\bar{P}_I$) und schliesslich in den unteren Teil gegen die Querbiege-Druckzone hin (für $\bar{P}_{II}$ und $\bar{P}_{III}$).

Auch bei diesem Träger stimmt die gesamte Querkraft Z sowohl auf der schlaff armierten Seite (Schnitt B_1-B_1) als auch auf der teilweise vorgespannten Seite (Schnitt B_R-B_R) mit steigender Last bzw. fortschreitender Rissbildung immer besser mit den theoretischen Werten gemäss Flanschfachwerk-Modell mit einem Ausbreitwinkel β von $\tan\beta = 0.5$ bis 0.6 überein.

4.4.3 Träger Z3, Z5 und Z6 (Längsschub mit Querbiegung/ und Quervorspannung)

Träger Z3

In Bild 28a oben ist der Verlauf der "gemessenen" Querkraft K_o in der oberen Plattenquerarmierung dargestellt. Ausser den ersten zwei dargestellten Laststufen (P_I , $\bar{P}_I$ und P_{II} , $\bar{P}_{II}$) weisen die vier folgenden Laststufen die gleiche Querbelastung $\bar{P}_{III}$ auf, wobei die Längsbelastung P von P_{II} auf $P = 54$ t gesteigert wurde. Bei der letzten Laststufe ($P = 54$ t, $\bar{P}_{III}$) wurde praktisch auf der ganzen Länge des Trägers der Fließwiderstand der oberen Querarmierung erreicht.

In Bild 28a unten ist die Querkraft K_o der oberen Querarmierung in den beiden Schnitten B_1-B_1 und B_R-B_R in Abhängigkeit der Last P dargestellt.

In Bild 28b oben ist der Verlauf der "gemessenen" Querkraften (bzw. Querkraften) K_o und K_u in den Messstrecken a-a der oberen und unteren Querarmierung bei der Bemessungsfließlast P_{III} , $\bar{P}_{III}$ aufgetragen. Dort, wo die untere Querarmierung gedrückt war, wurde die entsprechende Betondruckkraft mitberücksichtigt. Um aus K_o und K_u die nur durch die Längsbelastung P bewirkte Querkraft im Flansch zu ermitteln, d.h. um die Wirkung der Querbelastung $\bar{P}$ zu eliminieren, wurde auch hier wie bei Z4 vorgegangen:

Von der "gemessenen" Armierungskraft K_o wurde die im Schnitt a-a (gemäss Bild 47) theoretisch ermittelte Querbiege-Zugkraft $m_z = \bar{M}/z_p + \bar{Q}/2 \cdot \tan\alpha$ abgezogen, bzw. der "gemessenen" Kraft K_u wurde die theoretisch ermittelte Querbiege-Druckkraft $m_D = \bar{M}/z_o - \bar{Q}/2 \cdot \tan\alpha$ dazugezählt. Damit ergaben sich die neuen Kräfte $Z_o = K_o - m_z$ und $Z_u = K_u + m_D$, deren Verlauf in Bild 28b dargestellt ist. Die Summe dieser Kräfte ergibt schliesslich die allein durch die Längsbelastung P bewirkte und in Bild 28b ebenfalls aufgetragene Querkraft $Z = Z_o + Z_u$. Die theoretisch ermittelte Querbiege-Zugkraft im Schnitt a-a wurde unter Berücksichtigung der Neigung der Betondruckdiagonalen $\alpha \approx 45^\circ$ in der Platte für $\bar{Q}$ bestimmt.

In Bild 28b unten sind die derart ermittelten Kräfte Z_o , Z_u sowie deren Summe Z der Messstrecken a-a in den beiden Schnitten B_1-B_1 und B_R-B_R in Abhängigkeit von der Last P aufgezeichnet sowie mit theoretischen Werten nach Flanschfachwerk-Modell gemäss Gl. (4) verglichen.

Mit steigender Last P nähern sich die stets etwas kleineren Werte Z_o denjenigen von Z_u an. Dies deutet auf eine gewisse Verlagerung des Angriffspunktes der Querkraft Z aus dem unteren Teil der Platte gegen die Mitte hin.

Auch bei diesem Träger stimmt die gesamte Querkraft Z sowohl auf der schlaff armierten Seite (Schnitt B_1-B_1) als auch auf der teilweise vorgespannten Seite (Schnitt B_R-B_R) mit steigender Last bzw. fortschreitender Rissbildung immer besser mit den theoretischen Werten gemäss Flanschfachwerk-Modell mit einem Ausbreitwinkel β von $\tan\beta = 0.5$ bis 0.6 überein.

Träger Z5

In Bild 29a oben ist der Verlauf der "gemessenen" Querkraft K_o in der oberen Plattenquerarmierung dargestellt. Ausser den ersten zwei dargestellten Laststufen (P_I , $\bar{P}_I$ und P_{II} , $\bar{P}_{II}$) weisen die vier folgenden Laststufen die gleiche Querbelastung $\bar{P}_{III}$ auf, wobei die Längsbelastung P von P_{II} auf $P = 54$ t gesteigert wurde. Bei der letzten Laststufe ($P = 54$ t, $\bar{P}_{III}$) wurde praktisch auf der ganzen Länge des Trägers der Fließwiderstand der oberen Querarmierung erreicht.

In Bild 29a unten ist die Querkraft K_o der oberen Querarmierung in den beiden Schnitten B_1-B_1 und B_R-B_R in Abhängigkeit der Last P dargestellt.

Die Beanspruchung der oberen Querarmierung war praktisch gleich derjenigen des Trägers Z3 (gleiche obere Querarmierung).

In Bild 29b oben ist der Verlauf der "gemessenen" Querkraften (bzw. Querkraften) K_o und K_u in den Messstrecken a-a der oberen und unteren Querarmierung bei der Bemessungsfließlast P_{III} , $\bar{P}_{III}$ aufgetragen. Dort, wo die untere Querarmierung gedrückt war, wurde die Betondruckkraft mitberücksichtigt. Auch hier wurden wiederum (wie bei den Trägern Z3 und Z4) die Kräfte $Z_o = K_o - m_z$ und $Z_u = K_u + m_D$ bestimmt und deren Verlauf in Bild 29b dargestellt. Die Summe dieser Kräfte ergibt schliesslich die allein durch die Längsbelastung P bewirkte und in Bild 29b ebenfalls eingetragene Querkraft $Z = Z_o + Z_u$.

Im Vergleich zum Träger Z3 wies die untere Querkraft (bzw. Querkraft) K_u in den Bereichen IV "Längsschub mit Querbiegung" ca. 50% kleinere Werte auf (bei ca. 60% weniger unterer Querarmierung).

In Bild 29b unten sind die ermittelten Kräfte Z_o , Z_u sowie deren Summe Z der Messstrecken a-a in den beiden Schnitten B_1-B_1 und B_R-B_R in Abhängigkeit der Last P aufgezeichnet sowie mit theoretischen Werten nach Flanschfachwerk-Modell gemäss Gl. (4) verglichen.

Mit steigender Last P nimmt der anfangs kleinere Wert Z_o stärker zu als der (im Vergleich zum Träger Z3 kleinere) Wert Z_u . Etwa nach Erreichen der Bemessungsfließlast (P_{III} , $\bar{P}_{III}$) weisen beide Werte ähnliche Grössen auf. Dies deutet auf eine Verlagerung des Angriffspunktes der Querkraft Z aus dem unteren Teil zur Mitte der Platte hin.

Auch bei diesem Träger stimmt die gesamte Querkraft Z sowohl auf der schlaff armierten Seite (Schnitt B_1-B_1) als auch auf der teilweise vorgespannten Seite (Schnitt B_R-B_R) mit steigender Last bzw. fortschreitender Rissbildung immer besser mit den theoretischen Werten gemäss Flanschfachwerk-Modell mit einem Ausbreitwinkel β von $\tan\beta = 0.5$ bis 0.6 überein.

Träger Z6

In Bild 30a oben ist der Verlauf der "gemessenen" Querkraft K_o in der oberen Plattenquerarmierung dargestellt. Ausser den ersten zwei dargestellten Laststufen (P_I , $\bar{P}_I$ und

P_{II} , $\bar{P}_{II}$) weisen die folgenden Laststufen die gleiche Querbelastung $\bar{P}_{III}$ auf, wobei die Längsbelastung P von P_{II} auf $P = 54$ t gesteigert wurde. Bei der Bemessungsfließlast (P_{III} , $\bar{P}_{III}$) wurde auf der ganzen Länge des Trägers der Fließwiderstand der oberen Querarmierung erreicht.

In Bild 30a unten ist die Querkraft K_o der oberen Querarmierung in den beiden Schnitten B_1-B_1 und B_r-B_r in Abhängigkeit der Last P dargestellt.

Die im Vergleich zu den Trägern Z3 und Z5 in den Bereichen IV "Längsschub mit Querbiegung" um ca. 20% verringerte obere Querarmierung bewirkte ein relativ frühes Fließen derselben. Bis zum Fließbeginn wiesen die Querkraften K_o jedoch ähnliche Werte auf wie bei den Trägern Z3 und Z5.

In Bild 30b oben ist der Verlauf der "gemessenen" Querkraften (bzw. Querkraften) K_o und K_u in den Messstrecken a-a der oberen und unteren Querarmierung bei der Bemessungsfließlast P_{III} , $\bar{P}_{III}$ aufgetragen. Dort, wo die untere Querarmierung gedrückt war, wurde die Betondruckkraft mitberücksichtigt. Auch hier wurden wiederum (wie bei Z3, Z4 und Z5) die Kräfte $Z_o = K_o - m_z$ und $Z_u = K_u + m_D$ bestimmt und deren Verlauf in Bild 30b dargestellt. Die Summe dieser Kräfte ergibt schliesslich die allein durch die Längsbelastung bewirkte und in Bild 30b ebenfalls eingetragene Querkraft $Z = Z_o + Z_u$.

In Bild 30b unten sind die ermittelten Kräfte Z_o , Z_u sowie deren Summe Z der Messstrecken a-a in den beiden Schnitten B_1-B_1 und B_r-B_r in Abhängigkeit von der Last P aufgezeichnet sowie mit theoretischen Werten nach Flanschfachwerk-Modell gemäss Gl. (4) verglichen.

Im Vergleich mit dem Träger Z5 wiesen die Querkraft-Anteile Z_o und Z_u bis zur Bemessungsfließlast (P_{III} , $\bar{P}_{III}$) ähnliche Werte auf. Bei einer weiteren Laststeigerung $P > P_{III}$ konnte der obere Querkraft-Anteil Z_o nicht mehr vergrössert werden (Fließwiderstand erreicht). Bei diesem Träger blieb der Angriffspunkt der Querkraft Z im unteren Teil der Platte. Durch eine Verkleinerung des theoretischen Ausbreitwinkels β (auf $\tan \beta \leq 0.5$) konnte die Last trotz Fließens der oberen Armierung noch bis auf $P = 54$ t, $\bar{P}_{III}$ gesteigert werden. Auch bei diesem Träger konnte kein Unterschied in der Querkraft zwischen der linken (schlaff armierten) und der rechten (teilweise vorgespannten) Seite festgestellt werden.

4.5 Verlagerung des Angriffspunktes der Querkraft aus Längsschub

In Tabelle 15 sind für sämtliche Träger die Versuchsergebnisse der Messstrecken a-a in beiden Schnitten B_1-B_1 (schlaff armierte Seite) und B_r-B_r (teilweise vorgespannte Seite) zusammengestellt.

Es wurden folgende Grössen berechnet und eingetragen:

- K : "gemessene" Querkraft ($K_o + K_u$) in der Querarmierung (Träger Z1 und Z2)
- Z : durch die Längsbelastung P bewirkte Querkraft
($Z = Z_o + Z_u$, $Z_o = K_o - m_z$, $Z_u = K_u + m_D$)
- $\tan \beta$: experimentell bestimmter Ausbreitwinkel nach Gl. (4)
- τ : Längsschubspannung τ_{yx} nach Gl. (14)
- e : "gemessene" Exzentrizität des Angriffspunktes der Querkraft Z
- e_{max} : maximal anzusetzende Exzentrizität nach Gl. (23) im Anhang
- e/e_{max} : Verhältnis zwischen "gemessener" Exzentrizität e und e_{max}

In Bild 50 wurde die Verlagerung des Angriffspunktes der Querkraft aus Längsschub in den Messstrecken a-a in beiden Schnitten B_1-B_1 und B_r-B_r der Träger Z3 bis Z6 graphisch dargestellt und mit dem Wert gemäss dem theoretischen Ansatz für $e_{\max}$ nach Gl. (23) verglichen.

4.5.1 Längsschub allein, gleiche obere und untere Querarmierung

Bei den Trägern Z1 und Z2 wurde die obere und die untere Querarmierung etwa gleich stark beansprucht. Die Querkraft griff etwa in Plattenmitte an, entsprechend dem der Bemessung der Querarmierung zugrundegelegten Modell ($e \approx 0$).

4.5.2 Längsschub allein, ungleiche obere und untere Querarmierung

Eine hauptsächlich einlagig angeordnete Querarmierung (Träger Z4, anfängliche Prüfung auf Längsschub allein) bewirkte eine Verlagerung des Angriffspunktes der Querkraft zur vorhandenen Querarmierung hin ($e \rightarrow -z_p/2$).

Sofern die Exzentrizität e der Querkraft Z den Wert gemäss dem theoretischen Ansatz für $e_{\max}$ nach Gl. (23) im Anhang nicht (wesentlich) übersteigt, ist grundsätzlich keine Verminderung der Tragfähigkeit zu erwarten.

4.5.3 Längsschub mit Querbiegung, gleiche oder ungleiche obere und untere Armierung

Beim Träger Z4 (anfängliche Prüfung auf Längsschub allein) bewirkte das Aufbringen des Querbiegemomentes $\bar{M}$ eine Verlagerung der Querkraft von der oberen zur unteren Platten-seite hin, entsprechend dem der Bemessung der Querarmierung zugrundegelegten Modell ($e \rightarrow +z_p/2$).

Bei den Trägern Z3, Z5 und Z6 (Querbewehrung $\bar{P}$ jeweils um eine Stufe vorgezogen) bewirkte das Querbiegemoment $\bar{M}$ anfänglich eine Verlagerung der Querkraft gegen die (steifere) Querbiege-Druckzone hin. Mit dem Steigern der Längsbelastung P verlagerte sich die Querkraft bei Z3 und Z5 jedoch immer mehr gegen die Plattenmitte hin, entsprechend den der Bemessung der Querarmierung zugrundegelegten Modellen ($e \rightarrow \pm 0$).

Beim Träger Z6 verlagerte sich die Querkraft nach dem Fließen der oberen Querarmierung (ca. ab der Bemessungsfließlast P_{III} , $\bar{P}_{III}$) wieder gegen die Querbiege-Druckzone hin, entsprechend dem der Bemessung der Querarmierung zugrundegelegten Modell ($e \rightarrow +z_p/4$).

4.6 Rissverhalten

4.6.1 Träger Z1 und Z2

Die Bilder 31 und 33 zeigen die Entwicklung der Rissbilder. Zwei Arten von Rissen sind ersichtlich: "Biegerisse", die senkrecht zur Trägerachse verlaufen, und "Schubrisse", die von der Flanschmitte aus schräg zur Längsbiegearmierung verlaufen. Im Bereich der Trägermitte verlaufen die "Schubrisse" relativ steil, gegen das Trägerende hin jedoch immer flacher, d.h. mit kleinerer Neigung zur Trägerachse.

Träger Z1

In Bild 32 oben ist der Verlauf der grössten Rissbreiten längs der Zugplatte bei der Bemessungsfließlast P_{III} dargestellt.

In Bild 32 unten ist für die linke und rechte Seite des Trägers der Last-Rissbreiten-Verlauf der grössten "Schubrisse" im Bereich II aufgetragen. Es konnten bei beiden Seiten (gleiche Querarmierung) ähnliche Rissbreiten festgestellt werden. Bei der Gebrauchslast P_I betragen die grössten Rissbreiten 0.25 bzw. 0.20 mm und bei der Bemessungsfließ-

last P_{III} 0.40 bzw. 0.45 mm.

Träger Z2

Bild 34 oben zeigt den Verlauf der grössten Rissbreiten längs der Zugplatte bei der Bemessungsfließlast P_{III} . Auf der linken Seite (30% mehr Querarmierung) weisen die "Schubrisse" erwartungsgemäss wesentlich kleinere Breiten auf als jene auf der rechten Seite.

In Bild 34 unten ist für die linke und rechte Seite des Trägers der Last-Rissbreiten-Verlauf der grössten "Schubrisse" im Bereich II dargestellt. Die grössten Rissbreiten betragen bei der Gebrauchslast P_I auf der linken Seite 0.15 mm und auf der rechten Seite 0.25 mm. Bei der Bemessungsfließlast P_{III} ergaben sich Rissbreiten von 0.35 mm links und 0.55 mm rechts.

4.6.2 Träger Z4

Bild 35 zeigt die Entwicklung der Rissbilder.

In Bild 36 oben ist der Verlauf der grössten Rissbreiten längs der Zugplatte bei der Laststufe P_{III} , $\bar{P}_0$ dargestellt.

In Bild 36 unten ist für die linke und rechte Seite des Trägers der Last-Rissbreiten-Verlauf der grössten "Schubrisse" im Bereich IV aufgetragen. Auf der rechten Seite bewirkte die teilweise Quervorspannung sowohl eine höhere Risslast von 18 t (12 t auf der linken Seite) als auch wesentlich kleinere Rissbreiten im Gebrauchslast-Bereich.

4.6.3 Träger Z3, Z5 und Z6

Die Bilder 37 und 39 zeigen die Entwicklung der Rissbilder der Träger Z5 und Z6. Die Rissbilder und der Rissverlauf des Trägers Z3 sind fast gleich wie beim Träger Z5 und wurden deshalb nicht dargestellt. Bei allen drei Trägern (wie auch bei Z4 mit $\bar{P} > \bar{P}_0$) konnten die Risse infolge der zusätzlichen Querbiegebeanspruchung nicht mehr eindeutig nach Rissarten unterschieden werden.

Träger Z5

In Bild 38 oben ist der Verlauf der grössten Rissbreiten längs der Zugplatte bei vier charakteristischen Laststufen aufgetragen.

Bild 38 unten zeigt für die linke und rechte Seite des Trägers den Last-Rissbreiten-Verlauf der grössten Risse im Bereich IV. Die Rissbreiten auf der linken Seite (schlaff armiert) sind im Vergleich zu denjenigen auf der rechten Seite (teilweise vorgespannt) im Gebrauchslast-Bereich etwas grösser. Bei der Gebrauchslast P_I , $\bar{P}_I$ betragen die grössten Rissbreiten 0.15 mm links und 0.10 mm rechts. Bei der Bemessungsfließlast P_{III} , $\bar{P}_{III}$ ergaben sich Rissbreiten von 0.45 mm links und ebenfalls 0.45 mm rechts.

Träger Z6

Bild 40 oben zeigt den Verlauf der grössten Rissbreiten längs der Zugplatte bei vier charakteristischen Laststufen.

In Bild 40 unten ist für die linke und rechte Seite des Trägers der Last-Rissbreiten-Verlauf der grössten Risse im Bereich IV aufgetragen. Auch hier sind die Risse auf der linken Seite (schlaff armiert) bis zur Bemessungsfließlast P_{III} , $\bar{P}_{III}$ grösser als auf der rechten Seite (teilweise vorgespannt). Bei der Gebrauchslast P_I , $\bar{P}_I$ betragen die grössten Rissbreiten 0.25 mm links und 0.15 mm rechts. Bei der Bemessungsfließlast P_{III} , $\bar{P}_{III}$ ergaben sich Rissbreiten von 0.50 mm links und ebenfalls 0.50 mm rechts.

Die in Querrichtung teilweise vorgespannten Zugplatten zeigten im Vergleich mit den nur schlaff armierten Zugplatten ein günstigeres Rissverhalten. Zum Beispiel entstanden beim Träger Z6 die ersten, nicht senkrecht zur Trägeraxe verlaufenden Risse ("Schubrisse") auf der vorgespannten Seite (rechts) erst bei $\sim P_I/2$, $\bar{P}_I$. Dies entspricht bei $\gamma = Z \cdot d / \bar{M} \approx 0.9$ einem effektiven Vorspanngrad $\kappa' = M_{zul,V} / M_{g+p}$ von 1.0 (siehe Abschnitt 1.4.2) und somit einer "effektiven" Randzugspannung bei der Rissbildung σ_r von $\sim 33 \text{ kg/cm}^2$. Auf der schlaff armierten Seite (links) entstanden die ersten Risse schon beim Steigern der Querbelastung $\bar{P}$ bei $\sim P_0$, $3\bar{P}_I/4$, was bei $\gamma = 0$ einem effektiven Vorspanngrad κ' von 0.75 und somit einer "effektiven" Randzugspannung bei der Rissbildung σ_r von $\sim 37 \text{ kg/cm}^2$ entspricht.

Bei einem Bauwerk dürften zum Beispiel infolge Schwind- und Temperaturzwängungen, oft wiederholter Belastungen, usw. nicht derart hohe Randzugspannungen σ_r auftreten. Trotzdem hat die teilweise Vorspannung zwei wichtige Vorteile: erstens wird die Risslast erhöht und zweitens treten im Gebrauchslast-Bereich schmalere Risse auf als bei einem analogen nur schlaff armierten Bauteil.

4.7 Bruchverhalten

4.7.1 Träger Z1 und Z2

Bild 41 zeigt die Bruchbilder des Trägers Z1. Der Bruch (Schubbruch) erfolgte beim linken Trägerende, wo die Zugplatte durch die zusammen geschobene Querszugarmierung "verkürzt" war, bei der Last $P_U = 52 \text{ t}$. Anhand der Bruchbilder ist deutlich zu sehen wie wichtig es ist, die Querszugarmierung bis um das Versatzmass v "hinter" der konzentrierten Krafteinleitung einzulegen.

Der Träger Z2 versagte bei der Last $P_U = 58 \text{ t}$ durch Biegebruch. Bis Erreichen der Biegetragfähigkeit ($P_{UB} = 58 \text{ t}$) konnte kein Bruch im Flansch erzielt werden, obwohl aus den gemessenen Rissbreiten geschlossen werden konnte, dass bei nur wenig höherer Last vermutlich ein ähnlicher Bruch wie beim Träger Z1 erfolgt wäre.

4.7.2 Träger Z4

Bild 42 zeigt die Bruchbilder des Trägers Z4. Das Versagen erfolgte nahezu bei der Bemessungsfließlast P_{III} , $\bar{P}_{III}$, mit $\bar{P}_U \leq \bar{P}_{III}$ durch einen kombinierten Schub- und Biegebruch längs der schlaff armierten Zugplatte der linken Trägerhälfte. Die Bruchfläche verläuft relativ flach vom Stegansatz (unten) bis zu der im Flansch eingelegten Längsarmierung (oben).

4.7.3 Träger Z3, Z5 und Z6

Die Bilder 43 bis 45 zeigen die Bruchbilder der Träger Z3, Z5 und Z6. Alle drei Träger wiesen praktisch dasselbe Bruchverhalten wie der Träger Z4 auf.

Beim Träger Z3 erfolgte der Bruch längs der schlaff armierten Zugplatte der linken Trägerhälfte bei $P_U = 58 \text{ t}$, $\bar{P}_{III}$. Die Bruchfläche verläuft ebenfalls flach vom Stegansatz (unten) bis zu der im Flansch eingelegten Längsarmierung (oben).

Beim Träger Z5 erfolgte der Bruch gleichzeitig in beiden Flanshhälften längs der teilweise vorgespannten Zugplatte der rechten Trägerhälfte bei $P_U = 58 \text{ t}$, $\bar{P}_{III}$. Die beiden fast symmetrischen Bruchflächen verlaufen flach vom Stegansatz (unten) bis zu den im Flansch eingelegten Längsarmierungen.

Beim Träger Z6 erfolgte der Bruch gleichzeitig in beiden Flanshhälften längs der schlaff

armierten Zugplatte der linken Trägerhälfte bei $P_u = 56 \text{ t}$, $\bar{P}_{III}$. Auch hier verlaufen die beiden fast symmetrischen Bruchflächen flach vom Stegansatz (unten) bis zu den im Flansch eingelegten Längsarmierungen (oben).

5. FOLGERUNGEN

Nachstehend werden die wichtigsten Folgerungen aus den beschriebenen Versuchen (unter Hinweis auf entsprechende Bilder) wiederholt und zusammenfassend dargestellt.

5.1 Längsschub allein

5.1.1 Tragfähigkeit

Die Zugkraft K in der Plattenquerarmierung (Bilder 25 und 26) nähert sich mit steigender Längsbelastung P der Querkraft Z gemäss Flanschfachwerk-Modell (Bild 2)

$$Z = \frac{Q}{2 \cdot z} \cdot \frac{F_{eL}^{Fl}}{F_{eL}} \tan \beta \quad (4)$$

mit dem Ausbreitwinkel β von

$$\tan \beta = 0.5 \text{ bis } 0.6 \quad (16)$$

Die Formeln (4) und (16) wurden bestätigt für die beiden Fälle, wo

- die gesamte Längsarmierung ($F_{eL}^{Fl}/F_{eL} \approx 1$, Träger Z2)
- nur ein Teil der Längsarmierung ($F_{eL}^{Fl}/F_{eL} < 1$, Träger Z2)

ausserhalb des Steges im Zugflansch liegt. Beim zweiten Fall dürften diese Formeln mehr oder weniger auf der sicheren Seite liegen.

Das für die Anordnung der Querarmierung verwendete Versatzmass

$$v \approx 0.3 \cdot (z + 2 \cdot b_e) \quad (10)$$

hat sich als zweckmässig erwiesen.

Eine Verkürzung des Versatzmasses v mit Zusammenschieben der entsprechenden Querarmierung bei der Lasteinleitung gemäss Bild 49 wirkt sich ungünstig aus (Träger Z1, linke Seite). Eine solche Reduktion bewirkt eine lokale Vergrösserung des Ausbreitwinkels und damit der Querkraft.

Das Versatzmass v nach Gl. (10) sollte daher wenn möglich im Bereich konzentrierter Last-einleitungen auf der Zugflanschseite des Trägers nicht unterschritten werden. Andernfalls ist die Querarmierung entsprechend zu verstärken.

Die Längsarmierung muss in jedem Fall "hinter" dem Versatzmass einwandfrei verankert werden.

Eine hauptsächlich einlagig angeordnete Querarmierung (Träger Z4, Bilder 27a und 50) bewirkt eine Verlagerung des Angriffspunktes der Querkraft zur vorhandenen Querarmierung hin.

Die Beanspruchung in den beiden Lagen der Querarmierung entspricht den Kräften

$$K_{o,u} = \frac{Z}{2} \left(1 + \frac{2 \cdot e}{z_p} \right) \quad (17)$$

(Ein Vorschlag für die bei einer Bemessung maximal anzusetzenden Exzentrizität e wird im Anhang gemacht.)

5.1.2 Verhalten im Gebrauchszustand

Unter Berücksichtigung der kleinen Durchmesser und Abstände der eingelegten Armierungsstäbe sind die in den Versuchen festgestellten maximalen Rissbreiten beträchtlich.

Bei einer Bemessung der Querarmierung gemäss Gl. (4) mit $\tan\beta = 0.5$ bis 0.6 (anstatt mit $\tan\beta = 0.66$) sind bei der entsprechenden Gebrauchslast "Schubrissbreiten" bis zu 0.30 mm zu erwarten (Bilder 32 und 34).

5.2 Längsschub mit Querbiegung

5.2.1 Tragfähigkeit

Die Querkzugkraft Z ($Z_o + Z_u$) aus Längsschub allein (Bilder 27b bis 30b, linke Seite, bzw. Schnitt B_1-B_1) nähert sich mit steigender Längsbelastung der theoretischen Querkzugkraft gemäss Flanschfachwerk-Modell bzw. gemäss den Gleichungen (4) und (16).

Eine Verlagerung des Angriffspunktes der Querkzugkraft Z gegen die Biegedruckzone hin ist möglich (vgl. Bild 50).

Die Beanspruchung in den beiden Lagen der Querarmierung entspricht den Kräften

$$K_{o,u} = \frac{Z}{2} \left(1 + \frac{2 \cdot e}{z_p} \right) + \frac{M}{z_p} \quad (8)$$

(Ein Vorschlag für die bei einer Bemessung maximal anzusetzenden Exzentrizität e wird im Anhang gemacht.)

5.2.2 Verhalten im Gebrauchszustand

Der Angriffspunkt der angreifenden Querkzugkraft Z wird erst gegen das Fließen der Querarmierung hin vom Bemessungsmodell beeinflusst (Bild 50).

Bei einer Bemessung der Querarmierung unter Berücksichtigung einer Verlagerung des Angriffspunktes der Querkzugkraft mit den Kräften gemäss Gl. (8) sind bei der Gebrauchslast grössere Rissbreiten in Kauf zu nehmen als bei einer Bemessung mit zentrisch angreifender Querkzugkraft (Bilder 38, 40).

5.3 Längsschub mit Querbiegung und Quervorspannung

5.3.1 Tragfähigkeit

Die Querkzugkraft Z ($Z_o + Z_u$) aus Längsschub allein (Bilder 27b bis 30b, rechte Seite, bzw. Schnitt B_r-B_r) nähert sich auch hier mit steigender Längsbelastung der theoretischen Querkzugkraft gemäss Flanschfachwerk-Modell, resp. gemäss den Gleichungen (4) und (16).

Eine Verlagerung des Angriffspunktes der Querkzugkraft Z gegen die Biegedruckzone ist auch hier möglich (vgl. Bild 50). Dies bedeutet, dass auch hier dieselben, für Längsschub und Querbiegung abgeleiteten Gleichungen gelten. Für die Tragfähigkeit ist allein der Fließwiderstand der gesamten schlaffen und vorgespannten Querarmierung massgebend.

5.3.2 Verhalten im Gebrauchszustand

Eine teilweise Quervorspannung der Zugflanschen bewirkt kleinere Rissbreiten als nur eine schlaffe Armierung (Bilder 36, 38, 40). Erst oberhalb der Gebrauchslast - was für die Praxis allerdings nicht wesentlich ist - gleichen sich die Rissbreiten denjenigen von analogen, nur schlaff armierten Zugflanschen an.

ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

In Druck- bzw. Zugflanschen dünnwandiger Plattenbalken- und Hohlkastenquerschnitte treten ausser Längsdruck bzw. Längszug häufig auch Längsschub und Querbiegung auf.

In [1] und [2] ist über Versuche an Druckflanschen von sieben Stahlbetonträgern berichtet worden.

Gegenstand des vorliegenden Versuchsberichtes ist die Problematik in Zugflanschen. Es sollten die Grundlagen für die Entwicklung einfacher, mit der Wirklichkeit gut übereinstimmender Bemessungs-Modelle bereitgestellt werden. In den Jahren 1977 und 1978 wurden am Institut für Baustatik und Konstruktion der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich Versuche an sechs I-Trägern durchgeführt.

Der Bemessung der Plattenquerarmierung wurden grundsätzlich die folgenden Modelle zugrundegelegt (Bild 3):

Längsschub allein

Träger Z1, Z2: Flanschfachwerk-Modell (Bild 2)

Längsschub mit Querbiegung/ und Quervorspannung

Träger Z3 : Ueberlagerung der Armierungen aus zentrisch angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung

Träger Z5 : Ueberlagerung der Kräfte aus zentrisch angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung

Träger Z4, Z6: Ueberlagerung der Kräfte aus exzentrisch angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung

In der rechten Trägerhälfte von Z3 bis Z6 wurde die Zugplatte in Querrichtung teilweise vorgespannt.

Die Längsbiegearmierung wurde je zur Hälfte in beiden Flanschhälften angeordnet mit Ausnahme des Trägers Z2. Hier wurden nur 75% der Längsarmierung im Flansch angeordnet, die restlichen 25% wurden über dem Steg eingelegt.

Alle übrigen Parameter wie Trägerabmessungen, Querkraftarmierung des Steges, Druckflansch-armierung, Betonqualität, usw. wurden konstant gehalten (Bild 5).

Aufgrund der vorliegenden Versuchsergebnisse und den in Kapitel 5 dargestellten Folgerungen wird für die Bemessung der Armierungen in Zugflanschen für Längsschub mit Querbiegung und Quervorspannung folgendes Vorgehen empfohlen (Bezeichnungen siehe Bild 48).

1. Bestimmen der erforderlichen Fliesskapazität der Armierungen

Die Kräfte in der oberen und unteren Lage der Armierungen betragen

$$K_o^* = \frac{Z^*}{2} \left(1 - \frac{2 \cdot e}{z_p}\right) + \frac{\bar{M}^*}{z_p} \quad 1)$$

$$K_u^* = \frac{Z^*}{2} \left(1 + \frac{2 \cdot e}{z_p}\right) - \frac{\bar{M}^*}{z_p}$$

wobei
$$Z^* = \frac{Q^*}{2 \cdot z} \cdot \frac{F_{el}^{Fl}}{F_{el}} \cdot \tan \beta ; \quad \tan \beta = 0.5 \text{ bis } 0.6.$$

1) Die Schnittkräfte unter der rechnerischen Bruchlast sind mit * bezeichnet.

Die Exzentrizität e der Querkraft Z^* darf zu

$$e \leq e_{\max} = \frac{d}{2} \left(1 - \frac{\tau^*}{\tau_{\max}}\right) \quad 2)$$

angenommen werden mit

$$\tau^* = \frac{Q^*}{2 \cdot d \cdot z} \cdot \frac{F_{el}}{F_{eL}}$$

und $\tau_{\max}^*$ = obere Schubspannungsgrenze (gemäss Norm).

Das Versatzmass der Armierung, bezogen auf den Trägerquerschnitt mit der Querkraft Q , ist anzusetzen zu

$$v \approx 0.3 (z + 2 \cdot b_e).$$

Die Biegearmierung im Zugflansch ist "hinter" dem Versatzmass zu verankern.

2. Wahl der vorgespannten und der schlaffen Armierungen

Der Vorspanngrad ist nach wirtschaftlichen und konstruktiven Gesichtspunkten festzulegen. Im allgemeinen ohne Begrenzung nach oben oder nach unten.

Daraus resultieren die Vorspannkraft und der entsprechende Querschnitt F_{so} der vorgespannten Armierung.

Die Querschnitte der schlaffen Armierung sind so zu bestimmen, dass

$$F_{so} \cdot \sigma_{sf} + F_{eo} \cdot \sigma_{ef} = K_o^*$$

$$F_{eu} \cdot \sigma_{ef} = K_u^*$$

erfüllt wird.

In beiden Armierungslagen ist auf jeden Fall eine schlaffe Mindestarmierung von

$$\mu_{\min} = 0.10 \text{ bis } 0.15\%$$

einzulegen.

3. Nachweis der Rissesicherung

Sofern $\tan \beta = 0.6$ und $e = 0$ angenommen wurde und eher dünne und gut verteilte Armierungstäbe gewählt wurden, ist auch in nicht oder nur schwach quer vorgespannten Zugplatten ein befriedigendes Rissverhalten zu erwarten.

In anderen Fällen kann ein solches Verhalten angestrebt werden durch

- die Begrenzung des Spannungszuwachses $\Delta \sigma_s = \sigma_e$ in den Armierungen, oder
- die Anwendung einer geeigneten Rissformel.

Diese Empfehlungen gelten für Zugflansche symmetrischer I-Querschnitte. Bemessungsregeln für andere Querschnitte können sinngemäss hergeleitet werden.

2) Begründung siehe im Anhang.

RESUME ET RECOMMANDATIONS

Les dalles minces comprimées ou tendues des profils en T et des sections évidées sont fréquemment soumises à des sollicitations combinées d'effort tranchant longitudinal et de flexion transversale qui s'ajoutent à l'effort de compression ou de traction longitudinal.

[1] et [2] décrivent les essais sur dalles minces comprimées de sept poutres en béton armé.

Le présent rapport d'essais traite du problème des dalles minces soumises à une traction longitudinale. Il s'agit de pouvoir créer les bases pour le développement de modèles de dimensionnement simples et en accord avec le comportement réel. En 1977 et 1978, l'institut de statique et de construction de l'école polytechnique fédérale de Zurich a réalisé six essais sur poutres de profil I.

On s'est servi essentiellement des modèles suivants pour le dimensionnement de l'armature des dalles minces (figure 3).

Effort tranchant longitudinal seul

Poutres Z1, Z2: Modèle formé d'un système de barres triangulé situé dans l'aile de la poutre (figure 2).

Effort tranchant longitudinal avec flexion transversale/et précontrainte transversale

Poutre Z3 : Superposition de l'armature résistant à l'effort de traction transversal centré et à la flexion transversale.

Poutre Z5 : Superposition des forces résultant de l'effort de traction excentrique et de la flexion transversale.

Poutres Z4, Z6: Superposition des forces résultant de l'effort de traction excentrique et de la flexion transversale.

La dalle mince des poutres Z3 à Z6 fut partiellement précontrainte transversalement dans la moitié droite de la portée.

L'armature longitudinale fut répartie symétriquement dans l'aile à l'exception de la poutre Z2. L'armature de cette dernière fut placée à 75% dans l'aile et à 25% dans l'âme.

Tous les autres paramètres tels que les dimensions de la pièce, l'armature à l'effort tranchant dans l'âme, l'armature de compression dans l'aile, la qualité du béton, etc. furent maintenant constants (figure 5).

Se référant aux résultats des essais et aux déductions présentées au chapitre 5, nous pouvons recommander le procédé suivant pour le dimensionnement de l'armature des dalles minces tendues subissant un effort tranchant longitudinal avec flexion transversale et avec une précontrainte transversale (notations cf figure 48).

1. Détermination de la capacité portante nécessaire des armatures

Les forces reprises par la couche supérieure et inférieure des armatures sont les suivantes:

$$\begin{aligned} K_o^* &= \frac{Z^*}{2} \left(1 - \frac{2 \cdot e}{z_p}\right) + \frac{\bar{M}^*}{z_p} \\ K_u^* &= \frac{Z^*}{2} \left(1 + \frac{2 \cdot e}{z_p}\right) - \frac{\bar{M}^*}{z_p} \end{aligned} \quad 1)$$

où
$$Z^* = \frac{Q^*}{2 \cdot z} \cdot \frac{F_{el}^{Fl}}{F_{el}} \cdot \tan \beta \quad ; \quad \tan \beta = 0.5 \div 0.6.$$

L'excentricité e de la force de traction transversale peut être évaluée de la manière suivante

$$e \leq e_{\max} = \frac{d}{2} \left(1 - \frac{\tau^*}{\tau_{\max}^*}\right) \quad 2)$$

où
$$\tau^* = \frac{Q^*}{2 \cdot d \cdot z} \cdot \frac{F_{el}^{Fl}}{F_{el}}$$

et $\tau_{\max}^*$: limite supérieure de l'effort tangentiel (selon la norme).

L'armature transversale est décalée par rapport à la section envisagée soumise à l'effort tranchant Q d'une longueur égale à

$$v = \approx 0.3 (z + 2 \cdot b_e) .$$

L'armature de flexion dans l'aile tendue doit être ancrée au-delà de cette distance de décalage.

2. Choix de l'armature précontrainte et de l'armature passive

Le degré de précontrainte est choisi selon des critères économiques et constructifs. Généralement on ne fixe pas de borne supérieure ni inférieure.

On détermine ainsi la force de précontrainte et la section correspondante de l'armature de précontrainte F_{so} .

Les sections de l'armature passive sont déterminées par les équations suivantes:

$$F_{so} \cdot \sigma_{sf} + F_{eo} \cdot \sigma_{ef} = K_o^*$$

$$F_{eu} \cdot \sigma_{ef} = K_u^*$$

Il faut toutefois placer une armature minimale pour chaque couche d'armature

$$\mu_{\min} = 0.10 \div 0.15\%$$

1) Les efforts de réduction calculés avec la charge théorique de rupture portent le signe *.

2) Explications cf Annexe

3. Contrôle de la fissuration dans le domaine d'utilisation

En admettant des valeurs $\tan\beta = 0.6$ et $e = 0$ et en choisissant des barres d'armature plutôt fines et bien réparties, on peut s'attendre à un comportement à la fissuration favorable dans les dalles minces tendues avec aucune ou avec une faible armature de pré-contrainte transversale.

Dans d'autres cas on peut tendre vers un même comportement de fissuration favorable avec:

- la limitation de l'accroissement de contrainte $\Delta\sigma_s = \sigma_g$ dans l'armature ou bien avec
- l'application d'une formule adéquate permettant d'évaluer la fissuration.

Ces recommandations se rapportent aux ailes tendues des sections symétrique en I. Des règles de dimensionnement pour d'autres sections peuvent être déduites en adoptant un raisonnement conforme.

SUMMARY AND RECOMMENDATIONS

Compression and tension flanges of thin-walled T- and hollow box beams are subjected to longitudinal shear and transverse bending in addition to longitudinal compression and tension respectively.

Tests carried out on the compression flanges of seven reinforced concrete beams were reported in references [1] and [2].

The following report describes tests carried out during 1977-78 on the tension flanges of six reinforced concrete I-beams at the Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology Zurich. Simple models for the dimensioning of such members are also proposed.

Calculation of the transverse slab reinforcement was based on the following models (Fig. 3):

Longitudinal shear only

Beams Z1, Z2 : Flange truss model (Fig. 2)

Longitudinal shear with transverse bending and transverse prestressing

Beam Z3 : Superposition of reinforcement resulting from an axial transverse tension and transverse bending.

Beam Z5 : Superposition of forces resulting from an axial transverse tension and transverse bending.

Beams Z4, Z6 : Superposition of forces resulting from an eccentric transverse tension and transverse bending.

The tension flanges on the right hand half spans of beams Z3, Z4, Z5 and Z6 were partially prestressed in the transverse direction.

The longitudinal bending reinforcement was arranged symmetrically in the tension flange. The only exception to this was beam Z2, where 75% of this reinforcement was placed in the flange and the remaining 25% distributed in the web.

All other parameters such as beam dimensions, web shear reinforcement, compression flange reinforcement, concrete quality etc. were held constant for all the beams (Fig. 5).

Based on the test results and the conclusions set out in Section 5 of this report, the following design rules are suggested for the reinforcement in tension flanges of reinforced concrete beams subjected to longitudinal shear with transverse bending and transverse prestressing (see Fig. 48 for notations and symbols):

1. Determination of required yield capacity of reinforcement

The forces in the upper and lower layers of reinforcement are given by

$$\begin{aligned} K_o^* &= \frac{Z^*}{2} \left(1 - \frac{2 \cdot e}{z_p}\right) + \frac{\bar{M}^*}{z_p} \\ K_u^* &= \frac{Z^*}{2} \left(1 + \frac{2 \cdot e}{z_p}\right) - \frac{\bar{M}^*}{z_p} \end{aligned} \quad 1)$$

where $Z^* = \frac{Q^*}{2 \cdot z} \cdot \frac{F_{el}^{Fl}}{F_{el}} \cdot \tan \beta$; $\tan \beta = 0.5$ bis 0.6.

The eccentricity e of the transverse tensile force Z^* may be assumed to be given by

$$e \leq e_{\max} = \frac{d}{2} \left(1 - \frac{\tau^*}{\tau_{\max}}\right) \quad 2)$$

where

$$\tau^* = \frac{Q^*}{2 \cdot d \cdot z} \cdot \frac{F_{el}^{Fl}}{F_{el}}$$

$\tau_{\max}$ = upper limit to shear stress (according to code)

The displacement distance for the reinforcement in a beam cross-section under transverse shear Q is given by

$$v \approx 0.3 (z + 2 \cdot b_e)$$

The bending reinforcement should be anchored beyond the displacement point given by this expression.

2. Choice of prestressed and non-prestressed reinforcement

The degree of prestressing is to be chosen with due regard to economic and detailing aspects. As a general rule any value of degree of prestressing may be chosen.

Once this value has been chosen, the value of the prestressing force and the required area of prestressed reinforcement can easily be calculated.

The area of non-prestressed reinforcement is then chosen to satisfy the following conditions

$$F_{so} \cdot \sigma_{sf} + F_{eo} \cdot \sigma_{ef} = K_o^*$$

$$F_{eu} \cdot \sigma_{ef} = K_u^*$$

A minimum reinforcement on each side of $\mu_{\min} = 0.10$ to 0.15% should be provided.

1) Force with the suffix * are ultimate values

2) See appendix for derivation

3. Checking crack behaviour

With the assumptions of $\tan\beta = 0.6$ and $e = 0$ and the choice of well-distributed small-diameter reinforcement, a satisfactory crack behaviour may be expected in tension flanges without or only with light prestressing.

In other cases a satisfactory crack behaviour may be achieved through

- limiting the stress increase in the prestressed and non-prestressed reinforcement $\Delta\sigma_s$ and σ_e respectively, caused by cracking
- limiting crack widths calculated by suitable formulae.

These recommendations are valid for the tension of symmetrical I-cross-sections. Design rules for other types of cross-sections may be derived from these recommendations.

VERDANKUNGEN

Der vorliegende Versuchsbericht ist im Rahmen der 3. Phase des Forschungsprojektes "Teilweise Vorspannung im Brückenbau" ausgearbeitet worden. Dieses Programm wurde durch einen Beitrag aus dem

Kredit zur Förderung der Strassenbauforschung

des Eidgenössischen Departementes des Innern ermöglicht. Für diese grosszügige finanzielle Unterstützung möchten die Verfasser dem Eidg. Departement des Innern und der Kommission für Strassenbauforschung herzlich danken.

Den Firmen

Monteforno Stahl- und Walzwerke AG, Bodio
von Mooß Stahl AG, Luzern

sind die Verfasser für die zur Verfügung gestellten Armierungsstähle zu Dank verpflichtet.

Den Firmen

Cementfabrik Holderbank
Weiacher Kies AG

danken wir für die Ueberlassung von Zement und Zuschlagstoffen für die Betonherstellung.

Der Firma Stahlton AG, Zürich

danken wir für ihre Unterstützung bei der Ausführung der Quervorspannung bestens.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Badawy M., Bachmann H.: "Versuche über Längsschub und Querbiegung in Druckplatten von Betonträgern". Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 6504-8, Juni 1977, Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart.
- [2] Bacchetta A., Bachmann H.: "Versuche zur teilweisen Vorspannung für Längsschub und Querbiegung in Druckplatten von Betonträgern". Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 6504-9, Juli 1977, Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart.
- [3] Bachmann H.: "Längsschub und Querbiegung in Druckflanschen von Betonträgern". Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht Nr. 79, März 1978, Sonderdruck aus Beton- und Stahlbetonbau Nr. 3, März 1978, Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart.
- [4] Bachmann H., Bacchetta A.: "Teilweise Vorspannung für Längsschub und Querbiegung in Druckplatten von Betonträgern". Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht Nr. 82, 1978, Sonderdruck aus Beton- und Stahlbetonbau Nr. 5, 1978, Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart.
- [5] Norm SIA 162 (1968): "Norm für die Berechnung, Konstruktion und Ausführung von Bauwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), Zürich.
- [6] Thürlimann B.: "Schubbemessung bei Querbiegung", Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht Nr. 72, 1977, Sonderdruck aus Schweiz. Bauzeitung, Heft 26, 1977. Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart.

BEZEICHNUNGENGeometrische Grössen

b	Plattenbreite
b_o	Stegbreite
b_e	Abstand zwischen der in den Flanschhälften eingelegten Längsbiegearmierung
d	Plattendicke
e	Exzentrizität der Querkraft
e_{max}	maximale Exzentrizität der Querkraft
F_e	schlaaffe Plattenquerarmierung
F_s	vorgespannte Plattenquerarmierung
F_{eL}	gesamte Längsbiegearmierung
F_{eL}^{Fl}	in den Flanschen eingelegte Längsbiegearmierung
F_{eB}	Bügelarmierung
H	Trägerhöhe
h	statische Höhe des Trägers
h_p	statische Höhe der Zugplatte
k	Kennpunktabstand
l	Abstand der Querbelastrung
l_o	Basislänge
$\emptyset$	Durchmesser
t	Abstand
W	Widerstandsmoment
z	innerer Hebelarm des Trägers
z_p	innerer Hebelarm der Zugplatte
v	Versatzmass

Kraftgrössen

D	Druckkraft, Diagonaldruckkraft
ΔD	Druckkraft-Zuwachs
K	Zugkraft in der Plattenquerarmierung
K_o	Zugkraft in der oberen Armierungslage
K_u	Zugkraft in der unteren Armierungslage
M	Biegemoment
$\bar{M}$	Querbiegemoment
m_D	Querbiege-Druckkraft
m_Z	Querbiege-Zugkraft
P	Längsbelastung
P_f^{Th}	theoretische Fliesslant der Plattenquerarmierung infolge von Längsschub
P_{uB}^{Th}	theoretische Biegekapazität der Träger
$\bar{P}$	Querbelastrung
$\bar{P}_f^{Th}$	theoretische Fliesslant der Plattenquerarmierung infolge von Querbiegung

Q	Querkraft
V	Vorspannkraft
Z_1	Querzugkraft gemäss Flanschfachwerk-Modell
Z	Querzugkraft pro m' gemäss Flanschfachwerk-Modell, Zugkraft
ΔZ	Zugkraft-Zuwachs
Z_o	oberer Querzugkraft-Anteil
Z_u	unterer Querzugkraft-Anteil

Festigkeitswerte, Spannungen

β_w	Würfeldruckfestigkeit
β_p	Prismendruckfestigkeit
β_{bz}	Biegezugfestigkeit
β_{qz}	Querzugfestigkeit
β_z	Zugfestigkeit
σ_b	Betonspannung
σ_e	Stahlspannung
σ_s	Spannstahl-Spannung
σ_f	Fliessspannung
σ_r	Randzugspannung
σ_{sv}	Initialspannung
$\bar{\sigma}$	Spannungskomponente
$\bar{\sigma}_{max}$	maximale Spannungskomponente
$E(5\div 50)$	Sekanten-Elastizitätsmodul zwischen 5 kg/cm ² und 50 kg/cm ²
τ_{yx}	Längsschubspannung im Anschnitt Platte - Steg
τ_{yz}	Querschubspannung im Anschnitt Platte - Steg
τ_s	Schubspannung im Steg
τ_p	Schubspannung in der Platte
τ_{max}	obere Schubspannungsgrenze

Verformungen

ϵ_b	Betonstauchung
ϵ_e	Stahldehnung
ϵ_{em}	mittlere Stahldehnung
$\epsilon_{e\ max}$	maximale Stahldehnung im Rissquerschnitt
ϵ_f	Fliessdehnung
ϵ_u	Dehnung bei Höchstlast
Δl	Längenzuwachs
δ_s	Stegdurchbiegung
r	Rissbreite

Dimensionslose Parameter

α	Neigung der Betondruckdiagonalen
β	Ausbreitwinkel der Betondruckdiagonalen im Zugflansch
γ	Zugkraft-Momenten-Verhältnis bei kombinierter Beanspruchung
λ	Fliesskraftverhältnis
κ'	Vorspanngrad
κ	Verbundkoeffizient
μ	Armierungsgehalt der Plattenquerarmierung
μ_L	Armierungsgehalt der Längsarmierung
μ_B	Armierungsgehalt der Bügel im Steg
$\mu_{\min}$	Mindestarmierung

Indizes

I, II, III Stufen der Längs- bzw. Querbelastung

A	Anfangslast
B	Bügel
E	Endlast
Ex	experimentell
F1	Flansch
L	längs
P	Platte
Th	theoretisch
b	Beton
d	dynamisch
e	Stahl
f	fliessen
o	oben
s	Spannstahl, statisch
u	unten

Stähle

Ø mm	F _e cm ²	σ _{fd} t/cm ²	σ _{fs} t/cm ²	β _{zd} t/cm ²	β _{zs} t/cm ²	Stahlqualität	Verwendung
4	0.125	17.90	17.20	19.70	18.80	Spanndraht	Querarmierung Zugplatte Z3-Z6
6	0.281	4.92	4.75	5.42	5.18	Tor (behandelt)	Querarmierung Zugplatte Z1-Z2
6	0.281	5.57	5.28	6.42	6.10	Tor (behandelt)	Querarmierung Zugplatte Z3-Z6
8	0.503	5.55	5.25	7.14	6.68	Box-Ultra	Querarmierung Zugplatte Z3-Z6
12	1.08	5.19	4.95	7.00	6.66	Box-Ultra	Stegarmierung Z1-Z6
26	5.31	5.20	4.94	6.60	6.17	Box-Ultra	Längsarmierung Z1-Z6

Tabelle 1: Eigenschaften der Stähle (Mittelwerte)

Beton

Sand 0-4 mm	640 kg/m ³
Sand 4-8 mm	560 kg/m ³
Kies 8-16 mm	680 kg/m ³
Zement	325 kg/m ³
Wasser	180 kg/m ³
W/Z Faktor	0.55
Raumgewicht	2385 kg/m ³
Konsistenz	plastisch

Tabelle 2: Zusammensetzung
des Betons

Zementmörtel

Sand 0-4 mm	1480 kg/m ³
Zement	420 kg/m ³
Wasser	252 kg/m ³
W/Z Faktor	0.60
Raumgewicht	2160 kg/m ³
Konsistenz	erdfeucht

Tabelle 5: Zusammensetzung
des Zementmörtels

Beton

β _w (kg/cm ²)	β _p (kg/cm ²)	β _{bz} (kg/cm ²)	β _{qz} (kg/cm ²)
375	320	53	23

Tabelle 3: Konventionelle Festigkeitsweite *)

β _p ^{σ-c} (kg/cm ²)	ε _u (‰)	E ₅₋₅₀ (t/cm ²)	E ₅₋₁₀₀ (t/cm ²)
305	19	370	360

Tabelle 4: Spannungs-Dehnungsverhalten der
Betonprismen *)

Zementmörtel

β _w (kg/cm ²)	β _p (kg/cm ²)	β _{bz} (kg/cm ²)
290	242	50

Tabelle 6: Konventionelle Festigkeitswerte *)

*) Mittelwerte, im Prüfalter von 28 Tagen

Vorspanngrad : $\kappa' = \frac{M_{zul.V}}{M_{g+p}}$

$M_{zul.V}$: zulässiges Moment für volle Vorspannung
 M_{g+p} : Moment unter Gebrauchslast ($\frac{M_{pl}}{1.8}$)

Querschnittswerte :
 d, e, F, k, W
Querschnittskräfte :
 $Z, M, V, \gamma = \frac{Z}{M/d}$ (Zugkraft-Momenten-Verhältnis)

Untere Betonrandspannung am ungerissenen Querschnitt :

$$\sigma_r = \frac{M_{zul.V}}{W} + \frac{Z}{F} - \frac{V \cdot e}{W} - \frac{V}{F}$$
$$\sigma_r = M_{zul.V} \cdot \frac{1 + \gamma \frac{k}{d}}{W} - V \cdot \frac{e+k}{W}$$

Zulässiges Moment für volle Vorspannung :

$$M_{zul.V} = \frac{\sigma_r \cdot W + V(e+k)}{1 + \gamma \frac{k}{d}}$$

Tabelle 7: Einfluss von σ_r und γ auf den Vorspanngrad κ' im Anschnitt
Zugplatte/Steg der Träger Z 3, Z 5 und Z 6 (ungerissener Querschnitt,
Biegung mit zentrischem Zug)

Träger	Theoretische Werte						Experimentelle Werte			
	Steg		Zugplatte				Zugplatte			
	p_{uB}^{Th} (t)	τ_s (kg/cm ²)	p_f^{Th} (t)	τ_{yx} (kg/cm ²)	$\bar{p}_f^{Th}$ (t)	τ_{yz} (kg/cm ²)	p_u^{Ex} (t)	p_f^{Ex} (t)	$\bar{p}_f^{Ex}$ (t)	τ_{yx} (kg/cm ²)
Z 1 linke Seite rechte Seite	58	58	43	43	—	—	Bruch 52	40 43	—	52
Z 2 linke Seite rechte Seite	58	58	56 43	42 32	—	—	58 ¹⁾	49 46	—	43
Z 3 linke Seite rechte Seite	58	58	43	43	3.9	5.4	Bruch 58	43 46	3.9	58
Z 4 linke Seite rechte Seite	58	58	43	43	6.0	8.3	43	43	Bruch 6.0	43
Z 5 linke Seite rechte Seite	58	58	43	43	3.9	5.4	58 Bruch	43 46	3.9	58
Z 6 linke Seite rechte Seite	58	58	43	43	3.9	5.4	Bruch 56	33 > 33	3.9	56

1) Biegefließen der Längsarmierung

Tabelle 8: Theoretische und experimentelle Werte

Träger		
LS	P_A (t)	P_E (t)
1	2.5	2.5
2	12.0	11.8
3	18.0	17.5
4	24.0	23.5
5	33.0	31.8
6	40.0	38.7
7	43.0	41.7
8	46.0	44.3
9	49.0	46.6
10	52.0	Bruch

Tabelle 9: Belastungsprotokoll
Träger Z 1

Träger		
LS	P_A (t)	P_E (t)
1	2.5	2.5
2	12.0	11.8
3	18.0	17.7
4	24.0	23.5
5	33.0	31.6
6	40.0	38.1
7	43.0	41.2
8	46.0	44.4
9	49.0	46.9
10	52.0	49.9
11	54.0	51.8
12	56.0	53.9
13	58.0	55.1
14	58.0	55.0

Tabelle 10: Belastungsprotokoll
Träger Z 2

Träger Z 3				
LS	$P_A(t)$	$P_E(t)$	$\bar{P}_A(t)$	$\bar{P}_E(t)$
1	2.5	2.5	0.15	0.15
2	2.5	2.5	2.15	2.10
3	24.0	23.0	2.15	2.10
4	24.0	23.2	3.00	2.85
5	33.0	31.7	3.00	2.90
6	33.0	32.0	3.90	3.70
7	40.0	38.5	3.90	3.75
8	43.0	42.2	3.90	3.75
9	46.0	44.8	3.90	3.75
10	50.0	48.7	3.90	3.70
11	54.0	52.5	3.90	3.70
12	58.0	Bruch	3.90	Bruch

Tabelle 11 : Belastungsprotokoll
Träger Z 3

Träger Z 4				
LS	$P_A(t)$	$P_E(t)$	$\bar{P}_A(t)$	$\bar{P}_E(t)$
1	2.5	2.5	0.15	0.15
2	12.0	11.7	0.15	0.15
3	24.0	23.0	0.15	0.15
4	33.0	31.7	0.15	0.15
5	40.0	38.2	0.15	0.15
6	43.0	41.4	0.15	0.15
7	43.0	40.1	0.15	0.15
8	43.0	41.3	3.30	3.20
9	43.0	41.6	4.60	4.30
10	43.0	Bruch	6.00	Bruch

Tabelle 12 : Belastungsprotokoll
Träger Z 4

Träger Z 5				
LS	$P_A(t)$	$P_E(t)$	$\bar{P}_A(t)$	$\bar{P}_E(t)$
1	2.5	2.5	0.15	0.15
2	2.5	2.5	2.15	2.05
3	24.0	23.0	2.15	2.10
4	24.0	23.4	3.00	2.80
5	33.0	31.6	3.00	2.90
6	33.0	32.2	3.90	3.65
7	40.0	38.7	3.90	3.75
8	43.0	42.1	3.90	3.75
9	46.0	45.0	3.90	3.75
10	49.0	48.1	3.90	3.70
11	52.0	50.7	3.90	3.70
12	54.0	53.0	3.90	3.65
13	56.0	54.0	3.90	3.60
14	58.0	Bruch	3.90	Bruch

Tabelle 13 : Belastungsprotokoll
Träger Z 5

Träger Z 6				
LS	$P_A(t)$	$P_E(t)$	$\bar{P}_A(t)$	$\bar{P}_E(t)$
1	2.5	2.5	0.15	0.15
2	2.5	2.5	2.15	2.05
3	24.0	23.0	2.20	2.10
4	24.0	23.5	3.00	2.75
5	33.0	32.0	3.00	2.80
6	33.0	32.2	3.90	3.45
7	40.0	39.0	3.90	3.60
8	43.0	41.7	3.90	3.60
9	46.0	44.5	3.90	3.60
10	49.0	47.2	3.90	3.60
11	52.0	50.0	3.90	3.60
12	54.0	50.8	3.90	3.60
13	56.0	Bruch	3.90	Bruch

Tabelle 14 : Belastungsprotokoll
Träger Z 6

		linke Seite: $B_l - B_l$					rechte Seite: $B_r - B_r$				
		P_I	P_{II}	P_{III}	$P=49t$	$P=54t$	P_I	P_{II}	P_{III}	$P=49t$	$P=54t$
Z 1	K (t)						9.4	15.5	20.5	28.1 ¹⁾	—
	$\tan \beta$						0.39	0.47	0.48	0.57	—
Z 2	K (t)	6.1	9.9	15.9	21.2	26.3	4.3	8.1	17.1	20.6	21.3
	$\tan \beta$	0.34	0.40	0.50	0.57	0.65	0.24	0.33	0.53	0.56	0.53

1) interpolierte Werte

		linke Seite: $B_l - B_l$ (schlaff armiert)						rechte Seite: $B_r - B_r$ (teilweise vorgespannt)					
		P_I	P_{II}	$P_{III}, \bar{P}_0$	$P_{III}, \bar{P}_I$	$P_{III}, \bar{P}_{II}$	$P_{III}, \bar{P}_{III}^{3)}$	P_I	P_{II}	$P_{III}, \bar{P}_0$	$P_{III}, \bar{P}_I$	$P_{III}, \bar{P}_{II}$	$P_{III}, \bar{P}_{III}^{3)}$
	τ (kg/cm ²)	24	33	43	43	43	43	24	33	43	43	43	43
	e_{max}^2 (cm)	3.2	2.5	1.75	1.75	1.75	1.75	3.2	2.5	1.75	1.75	1.75	1.75
Z 4	Z (t)	6.5	13.7	18.3	20.0	24.2	25.7	14.0	17.3	22.7	22.0	22.7	25.3
	$\tan \beta$	0.27	0.42	0.43	0.47	0.56	0.60	0.58	0.52	0.53	0.51	0.53	0.59
	e/e_{max}	-0.77	-0.94	-1.16	0.26	0.43	1.06	-1.02	-1.13	-1.09	0.06	0.40	1.25

2) theoretischer Ansatz nach Gl. (23)

3) extrapolierte Werte

		linke Seite: $B_l - B_l$ (schlaff armiert)				rechte Seite: $B_r - B_r$ (teilweise vorgespannt)			
		$P_I, \bar{P}_I$	$P_{II}, \bar{P}_{II}$	$P_{III}, \bar{P}_{III}$	$P=54t, \bar{P}_{III}$	$P_I, \bar{P}_I$	$P_{II}, \bar{P}_{II}$	$P_{III}, \bar{P}_{III}$	$P=54t, \bar{P}_{III}$
	τ (kg/cm ²)	24	33	43	54	24	33	43	54
	e_{max}^2 (cm)	3.2	2.5	1.75	0.9	3.2	2.5	1.75	0.9
Z 3	Z (t)	9.0	1.56	26.0	34.5	7.8	15.5	26.0	34.3
	$\tan \beta$	0.38	0.47	0.60	0.65	0.33	0.47	0.60	0.64
	e/e_{max}	0.84	0.40	0.30	0.23	0.66	0.45	0.51	0.31
Z 5	Z (t)	7.3	1.56	23.3	33.0	8.0	13.7	23.3	33.0
	$\tan \beta$	0.30	0.47	0.54	0.61	0.33	0.42	0.54	0.61
	e/e_{max}	1.00	0.33	0.19	-0.16	0.73	0.48	0.12	-0.20
Z 6	Z (t)	8.2	1.67	24.3	2.60	9.3	15.5	22.7	26.0
	$\tan \beta$	0.34	0.51	0.56	0.48	0.39	0.47	0.53	0.48
	e/e_{max}	0.70	0.23	0.37	0.92	0.64	0.28	0.29	0.89

Tabelle 15: Versuchsergebnisse in den Messstrecken a - a

a – Längsschub allein

b – Längsschub + Querbiegung

c – Längsschub + Querbiegung + Quervorspannung

Bild 1: Problemstellung

Querschnitt :

System :

Raumfachwerk :

Kräfte dreieck :

$$D \cdot \cos \alpha = Q \cdot \cot \alpha$$

$$D' = \frac{D}{2} \cdot \cos \alpha = \frac{Q}{2} \cdot \cot \alpha$$

$$Z_1 = \frac{Q}{2} \cdot \cot \alpha \cdot \tan \beta$$

$$Z_{\text{pro m}} = \frac{Q}{2 \cdot z} \cdot \tan \beta$$

$$v = \frac{z}{2} \cdot \cot \alpha + \frac{b_e}{2} \cdot \cot \beta$$

Bild 2-a: Flanschfachwerk-Modell mit 2 Zugstäben (ganze Längsbiegearmierung ausserhalb Steg)

Querschnitt :

System :

Raumfachwerk :

Kräfte dreieck :

$$D \cdot \cos \alpha \cdot \frac{F_{eL}^{Fl}}{F_{eL}} = Q \cdot \cot \alpha \cdot \frac{F_{eL}^{Fl}}{F_{eL}}$$

$$D' = \frac{D}{2} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{F_{eL}^{Fl}}{F_{eL}} = \frac{Q}{2} \cdot \cot \alpha \cdot \frac{F_{eL}^{Fl}}{F_{eL}}$$

$$Z_1 = \frac{Q}{2} \cdot \cot \alpha \cdot \frac{F_{eL}^{Fl}}{F_{eL}} \cdot \tan \beta$$

$$Z_{\text{pro m}'} = \frac{Q}{2 \cdot z} \cdot \frac{F_{eL}^{Fl}}{F_{eL}} \cdot \tan \beta$$

$$v = \frac{z}{2} \cdot \cot \alpha + \frac{b_e}{2} \cdot \cot \beta$$

Bild 2 - b: Flanschfachwerk-Modell mit 3 Zugstäben (Längsbiegearmierung nur teilweise ausserhalb Steg)

Armierung für Längsschub allein ; $Z = \frac{Q}{2 \cdot z} \cdot \frac{F_{el}^{Fl}}{F_{eL}} \cdot \tan \beta$

$$\longrightarrow K_o = \frac{Z}{2}$$

$$\longrightarrow K_u = \frac{Z}{2}$$

Z1, Z2

Überlagerung der Armierungen aus zentrisch angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung

$$\longrightarrow K_o = \frac{Z}{2} + \frac{\bar{M}}{z_p}$$

$$\longrightarrow K_u = \frac{Z}{2}$$

Z3

Überlagerung der Kräfte aus exzentrisch mit $e = z_p/2$ angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung

$$\longrightarrow K_o = + \frac{\bar{M}}{z_p}$$

$$\longrightarrow K_u = Z - \frac{\bar{M}}{z_p}$$

Z4

Überlagerung der Kräfte aus zentrisch angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung

$$\longrightarrow K_o = \frac{Z}{2} + \frac{\bar{M}}{z_p}$$

$$\longrightarrow K_u = \frac{Z}{2} - \frac{\bar{M}}{z_p}$$

Z5

Überlagerung der Kräfte aus exzentrisch mit $e = z_p/4$ angreifender Querkzugkraft und aus Querbiegung

$$\longrightarrow K_o = \frac{Z}{4} + \frac{\bar{M}}{z_p}$$

$$\longrightarrow K_u = \frac{3Z}{4} - \frac{\bar{M}}{z_p}$$

Z6

Bild 3: Für die Versuchsträger verwendete Bemessungsmodelle

Z 1

Z 2

Um 30 % vergrößerte
Armierung gegenüber der
rechten Seite

Bild 4-a: Fließkräfte der Plattenquerarmierung

Bild 4-b: Fließkräfte der Plattenquerarmierung

Bild 5: Abmessungen und Armierungen (Bei Z 1, Z 3, Z 4, Z 5, Z 6 Längsbiegearmierung wie gezeichnet; bei Z 2 waren 2 von 8 Ø 26 über dem Steg angeordnet, anstelle der 2 Ø 8)

Bild 6-a: Plattenquervermierung ($\varnothing 6$) und Plattenlängsarmierung ($\varnothing 26$)

Bild 6-b-b: Plattenquerverarmierung ($\varnothing 6/8$ schlaff, $\varnothing 4$ vorgespannt) und Plattenlängsarmierung ($\varnothing 26$)

Bild 6-c: Plattenquervermierung ($\varnothing 6/8$ schlaff, $\varnothing 4$ vorgespannt) und Plattenlängsarmierung ($\varnothing 26$)

Bild 7: Quervorspannung der Zugplatte, vor und beim „Injizieren“

Bild 8: $\sigma - \epsilon$ - Diagramme der Plattenquerarmierung

Bild 9: $\sigma - \epsilon$ - Diagramm des Betons (nach 28 Tagen)

Laststellung P für Längsbeanspruchung :

Laststellung $\bar{P}$ für Querbeanspruchung:

Bild 10 : Belastungsanordnung für Längs- und Querbeanspruchung

Bild 11: Versuchsanlage für die Träger Z1 und Z2

Bild 12 : Versuchsanlage für die Träger Z3 bis Z6

Bild 13-a: Belastungsablauf beim Träger Z 1

Bild 13-b: Belastungsablauf beim Träger Z 2

Bild 14 : Belastungsablauf beim Träger Z 4

Bild 15: Belastungsablauf beim Träger Z5 (Z3 und Z6 analog)

Bild 16: Beispiel für die Durchbiegungen und die Stauchungen der Druckplatte

Bild 17: Beispiel für die Dehnungen der Längsbiegearmierung

Stahldehnungen ϵ_s in der Zugplatte (obere Lage)

Vergleich der Stahldehnungen in den Schnitten A und B

Bild 18: Dehnungen der oberen Längsbiegearmierung beim Träger Z 2

Obere = untere Lage der Plattenquerarmierung

Maximale Dehnungen der oberen Armierungslage

Maximale Dehnungen der unteren Armierungslage

Bild 19-a: Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 1

Bild 19-b : Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 1

Obere = untere Lage der Plattenquerarmierung

Maximale Dehnungen der oberen Armierungslage

Maximale Dehnungen der unteren Armierungslage

Bild 20- a : Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 2

Bild 20-b: Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 2

Obere Lage der Plattenquerarmierung

Untere Lage der Plattenquerarmierung

Maximale Dehnungen der oberen Armierungslage

Bild 21-a: Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 4

◦ obere Lage

◦ obere Lage

Bild 21-b: Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 4

Bild 21-c; Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 4

Bild 21-d: Dehnungen der Plattenquersarmierung beim Träger Z 4

Obere Lage der Plattenquerarmierung

Untere Lage der Plattenquerarmierung

Maximale Dehnungen der oberen Armierungslage

Bild 22- a: Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 3

Bild 22-b: Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 3

Bild 22-c; Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 3

Z 3

Verlauf der max. Dehnungen der Messstrecken a-a im Schnitt $B_1 - B_1$

Verlauf der max. Dehnungen der Messstrecken a-a im Schnitt $B_r - B_r$

Bild 22-d: Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 3

Bild 23- a: Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 5

Bild 23-b : Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 5

Bild 23 -c: Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 5

Verlauf der max. Dehnungen der Messstrecken a-a im Schnitt $B_I - B_I$

Verlauf der max. Dehnungen der Messstrecken a-a im Schnitt $B_r - B_r$

Bild 23-d: Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 5

Obere Lage der Plattenquerarmierung

Untere Lage der Plattenquerarmierung

Maximale Dehnungen der oberen Armierungslage

Bild 24-a: Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 6

Bild 24-b : Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z6

Bild 24-c: Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z 6

Verlauf der max. Dehnungen der Messstrecken a-a im Schnitt $B_I - B_I$

Verlauf der max. Dehnungen der Messstrecken a-a im Schnitt $B_r - B_r$

Bild 24 -d; Dehnungen der Plattenquerarmierung beim Träger Z6

Bild 25: Kräfteverlauf in der Plattenquerarmierung beim Träger Z 1

Bild 26 : Kräfteverlauf in der Plattenquerarmierung beim Träger Z 2

Kräfteverlauf in der oberen Plattenquerarmierung unter Längsschub allein

Bild 27-a: Kräfteverlauf unter Längsschub allein beim Träger Z 4

Bild 27-b: Kräfteverlauf in den Messstrecken a-a beim Träger Z 4

Kräfteverlauf in der oberen Plattenquerarmierung

Bild 28-a: Kräfteverlauf in der oberen Plattenquerarmierung beim Träger Z 3

Bild 28-b: Kräfteverlauf in den Messstrecken a-a beim Träger Z 3

Kräfteverlauf in der oberen Plattenquerarmierung

Bild 29-a: Kräfteverlauf in der oberen Plattenquerarmierung beim Träger Z 5

Bild 29-b: Kräfteverlauf in den Messstrecken a-a beim Träger Z 5

Bild 30-a: Kräfteverlauf in der oberen Plattenquerarmierung beim Träger Z 6

$K, Z \downarrow$ (t/m') Kräfteverlauf in den Messstrecken a-a bei $P_{III} = 43 \text{ t}$, $\bar{P}_{III} = 3.90 \text{ t}$

Kräfteverlauf im Schnitt $B_l - B_l$

Kräfteverlauf im Schnitt $B_r - B_r$

Bild 30-b: Kräfteverlauf in den Messstrecken a-a beim Träger Z 6

$P_I = 24 \text{ t}$

$P_{III} = 43 \text{ t}$

$P = 54 \text{ t}$

Bild 31: Rissebilder der Platte beim Träger Z1 (rechte Seite)

Obere = untere Lage der Plattenquerarmierung

Bild 32: Rissbreiten auf der Plattenoberseite beim Träger Z 1

$P_I = 24 \text{ t}$

$P_{III} = 43 \text{ t}$

$P = 56 \text{ t}$

Bild 33 - a: Rissebilder der Platte beim Träger Z 2 (linke Seite)

$P_I = 24 \text{ t}$

$P_{III} = 43 \text{ t}$

$P = 54 \text{ t}$

Bild 33-b: Rissebilder der Platte beim Träger Z2 (rechte Seite)

$P_{uB} = 58\text{ t}, \bar{P}_{III}$

Bild 33-c: Rissebild der ganzen Zugplatte beim Träger Z 2

Obere = untere Lage der Plattenquerarmierung

Verlauf der grössten Schubriss - Breiten im Bereich II

Bild 34: Rissbreiten auf der Plattenoberseite beim Träger Z 2

$P_I = 24 \text{ t}, \bar{P}_0$

$P_{III} = 43 \text{ t}, \bar{P}_0$

$P_{III} = 43 \text{ t}, \bar{P}_I = 3.90 \text{ t}$

Bild 35-a: Rissebilder der Platte beim Träger Z 4 (linke Seite)

$P_I = 24 \text{ t}$

$P_{III} = 43 \text{ t}, \bar{P}_0$

$P_{III} = 43 \text{ t}, \bar{P}_I = 3.90 \text{ t}$

Bild 35-b: Rissebilder der Platte beim Träger Z 4 (rechte Seite)

Obere Lage der Plattenquerarmierung

Maximale Rissbreiten längs der Zugplatte bei $P_{III}, \bar{P}_0$

Verlauf der grössten Schubriss-Breiten im Bereich IV

Bild 36: Rissbreiten auf der Plattenoberseite beim Träger Z 4

$P_I = 24 \text{ t}$, $\bar{P}_I = 2.15 \text{ t}$

$P_{III} = 43 \text{ t}$, $\bar{P}_{III} = 3.90 \text{ t}$

$P = 54 \text{ t}$, $\bar{P}_{III} = 3.90 \text{ t}$

Bild 37-a: Rissebilder der Platte beim Träger Z 5 (linke Seite)

$P_I = 24 \text{ t}$, $\bar{P}_I = 2.15 \text{ t}$

$P_{III} = 43 \text{ t}$, $\bar{P}_{III} = 3.90 \text{ t}$

$P = 54 \text{ t}$, $\bar{P}_{III} = 3.90 \text{ t}$

Bild 37-b: Rissebilder der Platte beim Träger Z 5 (rechte Seite)

Bild 38: Rissbreiten auf der Plattenoberseite beim Träger Z 5

$P_I = 24 \text{ t}$, $\bar{P}_I = 2.15 \text{ t}$

$P_{III} = 43 \text{ t}$, $\bar{P}_{III} = 3.90 \text{ t}$

$P = 54 \text{ t}$, $\bar{P}_{III} = 3.90 \text{ t}$

Bild 39 - a: Rissebilder der Platte beim Träger Z 6 (linke Seite)

$P_I = 24 \text{ t}$, $\bar{P}_I = 2.15 \text{ t}$

$P_{III} = 43 \text{ t}$, $\bar{P}_{III} = 3.90 \text{ t}$

$P = 54 \text{ t}$, $\bar{P}_{III} = 3.90 \text{ t}$

Bild 39-b: Rissebilder der Platte beim Träger Z 6 (rechte Seite)

Obere Lage der Plattenquerarmierung

Maximale Rissbreiten längs der Zugplatte

Verlauf der grössten Schubriss-Breiten im Bereich IV

Bild 40: Rissbreiten auf der Plattenoberseite beim Träger Z 6

Ansicht von unten ($P_u = 52t$)

Ansicht von oben ($P_u = 52t$)

Bild 41: . Bruchbilder der Platte beim Träger Z 1 (linke Seite)

Ansicht von unten ($P_{III} = 43t$, $\bar{P}_u \leq 6.00t$)

Ansicht von oben ($P_{III} = 43t$, $\bar{P}_u \leq 6.00t$)

Bild 42: Bruchbilder der Platte beim Träger Z 4 (linke Seite)

Ansicht von unten ($P_u = 58t$)

Ansicht von oben ($P_u = 58t$)

Bild 43: Bruchbilder der Platte beim Träger Z 3 (linke Seite)

Ansicht von unten ($P_u = 58 \text{ t}$)

Ansicht von oben ($P_u = 58 \text{ t}$)

Bild 44: Bruchbilder der Platte beim Träger Z 5 (rechte Seite)

Ansicht von unten ($P_u = 56 \text{ t}$)

Ansicht von oben ($P_u = 56 \text{ t}$)

Bild 45: Bruchbilder der Platte beim Träger Z 6 (linke Seite)

Bild 46: Korrektur der gemessenen Dehnungen der Querarmierung in der Zugplatte

Bild 47: Einfluss des Querbiegemomentes $\bar{M}$ auf die Querkzugkraft in der Plattenquerarmierung: m_z und m_D

Bild 48: Bezeichnungen zu den Bemessungs - Empfehlungen

Bild 49: Flanschfachwerk beim „verkürzten Versatzmass“

Träger Z 4:

Schnitt B_l - B_l

Schnitt B_r - B_r

Träger Z 3:

Schnitt B_l - B_l

Schnitt B_r - B_r

Träger Z 5:

Schnitt B_l - B_l

Schnitt B_r - B_r

Träger Z 6:

Schnitt B_l - B_l

Schnitt B_r - B_r

1) theoretischer Aussch nach Gl (23)

2) extrapolierte Werte

Bild 50: Verlagerung des Angriffspunktes der Querkraft aus Längsschub

Querschnitt :

Flanschfachwerk :

$$Z = \frac{Q}{2 \cdot z} \cdot \frac{F_{eL}}{F_{eL}} \cdot \tan \beta$$

a) Längsschub allein, gleiche obere und untere Querarmierung

$$\bar{D} = \bar{G} \cdot d = Z$$

$$\rightarrow K_o = \frac{Z}{2}$$

$$\rightarrow K_u = \frac{Z}{2}$$

b) Längsschub allein, ungleiche obere und untere Querarmierung

$$\bar{D} = \bar{G}_{max} \cdot d_e = Z$$

$$\rightarrow K_o = \frac{Z}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot e_{max}}{z_p}\right)$$

$$\rightarrow K_u = \frac{Z}{2} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot e_{max}}{z_p}\right)$$

c) Längsschub mit Querbiegung, gleiche oder ungleiche obere und untere Querarmierung

$$\bar{D} = \bar{G}_{max} \cdot d_e = Z$$

$$\rightarrow K_o = \frac{Z}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot e_{max}}{z_p}\right) + \frac{\bar{M}}{z_p}$$

$$\rightarrow K_u = \frac{Z}{2} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot e_{max}}{z_p}\right) - \frac{\bar{M}}{z_p}$$

Bild 51: Gleichgewicht im Grenzzustand

Träger Z 4

Träger Z 3

Träger Z 5

Träger Z 6

Bild 52: Vergleich mit Versuchsergebnisse

Bild 53: „Interaktionsdiagramme“ für $d/z_p = 1.2$

A N H A N G

Vorschlag für die maximal anzusetzende Exzentrizität e der Querkzugkraft aus Längsschub1. Theoretischer Ansatz

B. Thürlimann hat in [6] die plastische Analyse eines Fachwerk-Modells auf den Fall mit zusätzlicher Querbiegung erweitert. Sinngemäss wird hier für Längsschub allein sowie für Längsschub mit Querbiegung ein Vorschlag für die bei einer Bemessung maximal anzusetzende Exzentrizität e der Querkzugkraft aus Längsschub dargelegt (Bild 51).

a) Längsschub allein, gleiche obere und untere Querarmierung

Im Schnitt I-I stehen (im Bruchzustand) die gleich grossen Fliesskräfte K_o , K_u der oberen und unteren Querarmierung bzw. die zentrisch angreifende Querkzugkraft Z im Gleichgewicht mit der senkrecht zur Balkenaxe stehende Komponente $\bar{D}$ der schrägen Druckkraft D in der Diagonalen des Flanschfachwerkes (Bild 51a). Die Komponenten $\bar{\sigma}$ der Druckspannungen σ sind gleichmässig über die Plattendicke d verteilt.

$$\bar{D} = Z = \frac{Q}{2 \cdot z} \cdot \frac{F_{eL}^{Fl}}{F_{eL}} \cdot \tan \beta \triangleq K_o + K_u \quad (18)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{D}}{d} = \tau \cdot \tan \beta \quad (19)$$

b) Längsschub allein, jedoch ungleiche obere und untere Querarmierung

Im Schnitt I-I stehen (im Bruchzustand) die ungleich grossen Fliesskräfte K_o , K_u der oberen und unteren Querarmierung bzw. die exzentrisch angreifende Querkzugkraft Z im Gleichgewicht mit der senkrecht zur Balkenaxe stehenden Komponenten $\bar{D}$ der schrägen Druckkraft D in der Diagonalen des Flanschfachwerkes (Bild 51b). Wird näherungsweise eine gleichmässige Verteilung der Komponenten $\bar{\sigma}$ der Druckspannungen σ angenommen, so erreicht die Exzentrizität e ihren Extremwert $e_{\max}$ wenn die Spannungen σ bzw. $\bar{\sigma}$ auf die Dicke d_e verteilt den Grenzwert $\sigma_{\max}$ bzw. $\bar{\sigma}_{\max}$ erreichen:

$$d_e \cdot \sigma_{\max} = d \cdot \sigma ; \quad d_e \cdot \bar{\sigma}_{\max} = d \cdot \bar{\sigma} \quad (20)$$

In einem Versuch entspricht dieser Grenzwert der Stauchung des Betons im Druckfeld. In Bemessungsvorschriften werden die schrägen Betondruckspannungen durch das Einführen einer oberen Schubspannungsgrenze $\tau_{\max}$ begrenzt. Daher ist folgender Ansatz plausibel:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_{\max}} = \frac{\tau}{\tau_{\max}} \quad (21)$$

Darin ist die Längsschubspannung

$$\tau = \frac{Q}{2 \cdot d \cdot z} \cdot \frac{F_{eL}^{Fl}}{F_{eL}} \quad (22)$$

Somit wird

$$e_{\max} = \frac{d}{2} - \frac{d_e}{2} = \frac{d}{2} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{\max}} \right) \quad (23)$$

c) Längsschub mit Querbiegung, gleiche oder ungleiche obere und untere Querarmierung

Wird zum Längsschub zusätzlich ein Querbiegemoment $\bar{M}$ aufgebracht (Bild 51c), so werden die Kräfte K_o , K_u in der oberen und unteren Querarmierung um die Querbiege-Zugkraft vergrößert bzw. um die Querbiege-Druckkraft verkleinert.

Im Schnitt I-I steht auch hier die exzentrisch angreifende Querkraft Z im Gleichgewicht mit der senkrecht zur Balkenaxe stehenden Komponenten $\bar{D}$ der schrägen Druckkraft D in der Diagonalen des Flanschfachwerkes (Bild 51c). Wird näherungsweise eine gleichmässige Verteilung der Komponenten $\bar{\sigma}$ der Druckspannungen σ angenommen, so erreicht die Exzentrizität e ihren Extremwert $e_{\max}$ wenn die Spannungen σ bzw. $\bar{\sigma}$ auf die Dicke d_e verteilt den Grenzwert $\sigma_{\max}$ bzw. $\bar{\sigma}_{\max}$ erreichen:

$$d_e \cdot \sigma_{\max} = d \cdot \sigma ; \quad d_e \cdot \bar{\sigma}_{\max} = d \cdot \bar{\sigma} \quad (20)$$

In einem Versuch entspricht dieser Grenzwert der Stauchung des Betons im Druckfeld. In Bemessungsvorschriften werden die schrägen Betondruckspannungen durch das Einführen einer oberen Schubspannungsgrenze $\tau_{\max}$ begrenzt. Daher ist folgender Ansatz plausibel:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_{\max}} = \frac{\tau}{\tau_{\max}} \quad (21)$$

Darin ist die Längsschubspannung

$$\tau = \frac{Q}{2 \cdot d \cdot z} \cdot \frac{F_{eL}}{F_{eL}} \quad (22)$$

Somit wird

$$e_{\max} = \frac{d}{2} - \frac{d_e}{2} = \frac{d}{2} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{\max}} \right) \quad (23)$$

Unter Berücksichtigung der maximal anzusetzenden Exzentrizität $e_{\max}$ der Querkraft kann die erforderliche Fliesskraft der Armierungen somit aus folgenden Formeln bestimmt werden:

$$K_{o,u} = \frac{Z}{2} \left(1 \pm \frac{2 \cdot e_{\max}}{z_p} \right) \pm \frac{\bar{M}}{z_p} \quad (24)$$

$$\text{bzw.} \quad K_{o,u} = \frac{Z}{2} \left[\left(1 \pm \frac{d}{z_p} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{\max}} \right) \right) \pm \frac{\bar{M}}{z_p} \right] \quad (25)$$

Für $\tau = \tau_{\max}$ (bzw. für $e_{\max} = 0$) vereinfacht sich die Gleichung (24) bzw. (25) zu

$$K_{o,u} = \frac{Z}{2} \pm \frac{\bar{M}}{z_p} \quad (7)$$

2. Vergleich mit Versuchsergebnissen

Bild 52 zeigt den Vergleich zwischen der Querkraft Z gemäss dem Flanschfachwerk nach Gl. (4) mit einem Ausbreitwinkel β von $\tan\beta = 0.6$ bei der Bruchlast und der Querkraft Z aus Gl. (24) bzw. (25). Die obere Schubspannungsgrenze $\tau_{\max}$ wurde gemäss RL 34 der Norm SIA 162 [5] zu $6\tau_1^* = 66 \text{ kg/cm}^2$ angesetzt.

Bei allen vier Trägern liegen die Versuchsergebnisse auf der sicheren Seite der Kurven entsprechend der Gl. (24) bzw. Gl. (25). Die relativ grosse Reserve bei Träger Z4 lässt auf ein Unterschätzen der oberen Schubspannungsgrenze $\tau_{\max}$ bzw. der maximal anzusetzenden Exzentrizität $e_{\max}$ schliessen. Wird die obere Schubspannungsgrenze um $\Delta\tau_{\max} = 30\%$ erhöht, so erzielt man eine bessere Übereinstimmung (in Bild 51a eingetragen). Die relativ grosse Reserve beim Träger Z6 kann mit der Verkleinerung des Ausbreitwinkels β auf $\tan\beta < 0.5$ (vgl. Bild 30b) erklärt werden. Wird der Ausbreitwinkel β auf $\tan\beta = 0.4$ angesetzt, so erzielt man ebenfalls eine gute Übereinstimmung (in Bild 51c eingetragen).

3. Allgemeine Interaktions-Diagramme

Das Bild 53 zeigt zwei aufgrund der Gleichungen (23) und (24) für $d/z_p = 1.2$ dargestellte Interaktions-Diagramme.

- Wird in einem Querschnitt oben und unten die gleiche Querarmierung für die Querkraft Z eingelegt ($K_o = K_u = Z/2$), so kann aus Bild 53a herausgelesen werden, welches Querbiegemoment $\bar{M} = Z \cdot e_{\max}$ dieser Querschnitt noch aufnehmen kann.
- Ist in einem Querschnitt vorerst nur Querarmierung für das Querbiegemoment $\bar{M}$ vorhanden (oben für $\bar{M}/z_p$; unten keine), so kann aus Bild 53b herausgelesen werden, wieviel zusätzliche Querarmierung entsprechend den Kräften $\eta_{o,u} \cdot \bar{M}/z_p$ dieser Querschnitt benötigt, um noch die Querkraft Z aufnehmen zu können.

Die Diagramme wurden wie folgt hergeleitet:

Aus Gl. (23) ergibt sich

$$\frac{e_{\max}}{z_p/2} = \frac{d}{z_p} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{\max}}\right)$$

Aus Gl. (24) wird für K_u

$$\frac{Z}{\bar{M}/z_p} = (1 + \eta_u) \cdot \frac{2}{1 + \frac{2 \cdot e_{\max}}{z_p}}$$

Aus Gl. (24) wird für K_o

$$\frac{Z}{\bar{M}/z_p} = \eta_o \cdot \frac{2}{1 - \frac{2 \cdot e_{\max}}{z_p}}$$