Es läßt sich demnach folgern, daß die für die Ermittlung der Betonzugspannungen übliche Berechnungsweise nach Zustand I mit $n = 15$ oder $n = 10$ in der Anwendung insofern einer Einschränkung bedarf, als sie nur bei einer Bewehrungsstärke bis zu etwa 1 % anwendbar ist. Bei wesentlich größerer Bewehrungsstärke wird richtiger entweder nach Zustand I mit etwa $n = 40$ oder aber nach Zustand Ia mit $E_{b_z} = 0{,}4 \cdot E_{b_d}$ gerechnet.

5. Die Schubsicherheit.

α) Allgemeines.

Die Wirkung zu großer Querkräfte äußert sich bekanntlich darin, daß in der Nähe der Auflager der Tragwerke zunächst schräg gerichtete Schubrisse auftreten, die senkrecht zu den Hauptzugspannungen, also in Richtung der Hauptdruckspannungen, verlaufen. Diese Risse, die eine Folge der Überwindung der Schubfestigkeit des Betons sind, breiten sich mit weiter zunehmender Belastung rasch über die ganze Querschnittshöhe aus und führen schließlich die vollständige Zerstörung des Verbundes herbei.

Um das Auftreten der Schubrisse möglichst hinauszuschieben und die Schubfestigkeit des Verbundes zu erhöhen, wird bekanntlich eine aus abgebogenen Eisen sowie erforderlichenfalls noch aus Bügeln und Zulageeisen bestehende Schubsicherung angeordnet. Diese Sicherung darf, wie die Erfahrung lehrt, im allgemeinen als so wirksam angesehen werden, daß die Zerstörung des Verbundes in den meisten Fällen eher infolge der Wirkung zu großer Momente als infolge der Wirkung zu großer Querkräfte eintreten wird.

Nach den D. B. (§ 20) sind alle größeren Schubspannungen durch abgebogene Eisen oder durch Bügel oder durch abgebogene Eisen und Bügel aufzunehmen. Dabei ist die jeweils vorhandene Schubspannung aus der Gleichung

$$\tau_0 = \frac{Q}{b \cdot z} \tag{46}$$

zu berechnen, wobei Q die Querkraft, b die Platten- oder Balkenbreite und z den Abstand des Schwerpunktes der Zugeisen vom Druckmittelpunkt bedeuten. Dieselbe darf bei Verwendung von Beton mit $\sigma_{w_{28}} \geqq 160$ kg/cm² den Wert $\tau_0 = 16$ kg/cm², bei sonstigem Beton den Wert $\tau_0 = 14$ kg/cm² nicht überschreiten.

Im Hinblick auf die besonderen Festigkeitseigenschaften von hoch- oder höchstwertigem Beton erscheint die in den D. B. bei Verwendung eines derartigen Betons festgelegte obere Begrenzung der Schubspannungen mit 16 kg/cm² etwas gering. Dieselbe wird deshalb in den weiteren Ausführungen auf $\tau_0 = 18$ kg/cm² erhöht. Dabei wird gezeigt, daß sich mit einer derartigen Erhöhung immer noch ein ausreichender Sicherheitsgrad ergibt.

Die nachfolgende Ableitung dient dazu, ein Bild über die Veränderlichkeit von τ_0 zu gewinnen, wenn die zulässigen Beanspruchungen erhöht werden. Wird

$$h = r \cdot \sqrt{\frac{M}{b}}$$

und

$$z = h \cdot \left(1 - \frac{s}{3}\right) = r \cdot \left(1 - \frac{s}{3}\right) \cdot \sqrt{\frac{M}{b}}$$

gesetzt, so ist bei gleichbleibendem Moment der Ausdruck $r \cdot \left(1 - \frac{s}{3}\right)$ für diese

Veränderlichkeit maßgebend. In Abb. 23 ist dieselbe für veränderliche Betondruck- und Eisenzugspannungen, bezogen auf $\sigma = 40/1200$ kg/cm², sowohl für $n = 15$ wie für $n = 10$ dargestellt.

Der Abb. 23 ist zu entnehmen, daß bei gleichbleibender Betondruckspannung und zunehmender Eisenzugspannung die Werte τ_0 etwas abnehmen, daß sie aber bei gleichbleibender Eisenzugspannung und zunehmender Betondruckspannung rasch größer werden. Während sie im ersten Falle bei einer Erhöhung der zulässigen Eisenzugspannung von z. B. $\sigma_e = 1200$ kg/cm² auf $\sigma_e = 2000$ kg/cm² im Durchschnitt um etwa 15 % abnehmen, vergrößern sie sich im letzten Falle bei einer Erhöhung der zulässigen Betondruckspannung von z. B. $\sigma_b = 40$ kg/cm² auf $\sigma_b = 70$ kg/cm² im Durchschnitt um etwa 60 % und bei einer Erhöhung von $\sigma_b = 40$ kg/cm² auf $\sigma_b = 100$ kg/cm² im Durchschnitt sogar um etwa 110 %.

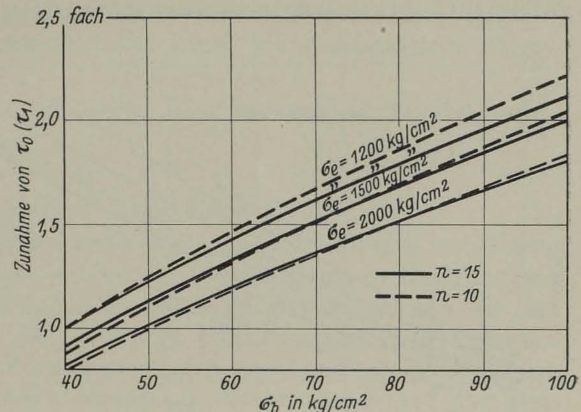

Abb. 23. Zunahme der Schub- und Haftspannungen bei Zulassung erhöhter Beanspruchungen, bezogen auf $\sigma = 40/1200$ kg/cm².

Allerdings bleiben trotz dieser Vergrößerung die Werte τ_0 bei Platten durchweg gering. Nur bei Balken mit sehr großen Belastungen oder bei solchen mit teilweiser oder voller Endeinspannung können sich größere Schubspannungen ergeben. Dabei ist das Schlankheitsverhältnis h/l für die erreichbaren Werte τ_0 insofern von maßgebendem Einfluß, als dieselben bei Einhaltung bestimmter zulässiger Beanspruchungen mit abnehmender Spannweite bzw. Entfernung der Momentennullpunkte und zunehmender Querschnittshöhe größer werden.

Es soll deshalb untersucht werden, inwieweit das Schlankheitsverhältnis von Balken für bestimmte erhöhte zulässige Beanspruchungen zu begrenzen ist, damit bei Verwendung von hoch- oder höchstwertigem Beton $\tau_0 = 18$ kg/cm² nicht überschritten wird. Dabei sei vom allgemeinsten Belastungsfall, nämlich von jenem mit gleichmäßig verteilter Belastung q (kg/lfdm) ausgegangen.

Beträgt die größte Querkraft

$$Q = \frac{q \cdot l}{2},$$

das größte Feldmoment

$$M = \frac{q \cdot l^2}{k},$$

wobei k ein von der Endauflagerung abhängiger Beiwert ist, der sich zwischen $k = 8$ (freie Endauflagerung) und $k = 24$ (volle Endeinspannung) verändern kann, so läßt sich Gl. 46 auch schreiben in der Form

$$\tau_0 = \frac{q \cdot l}{2 \cdot b \cdot z} = \frac{k \cdot M}{2 \cdot b \cdot l \cdot z},$$

und mit $M = \frac{h^2}{r^2} \cdot b$ und $z = h \cdot \left(1 - \frac{s}{3}\right)$ wird

$$\tau_0 = \frac{k}{2 \cdot r^2 \cdot \left(1 - \frac{s}{3}\right)} \cdot \frac{h}{l} = c_1 \cdot \frac{h}{l}. \tag{47}$$

Die für Beanspruchungen von $\sigma = 40/1200$ kg/cm² bis zu $\sigma = 100/2000$ kg/cm² bei freier Endauflagerung mit $n = 15$ bzw. $n = 10$ ermittelten Beiwerte c_1 sind in Abb. 24 dargestellt. Sie ermöglichen es, bei bekanntem Schlankheitsverhältnis von Platten und Balken und bei bekannten Querschnittsbeanspruchungen die auftretenden Schubspannungen direkt zu bestimmen.

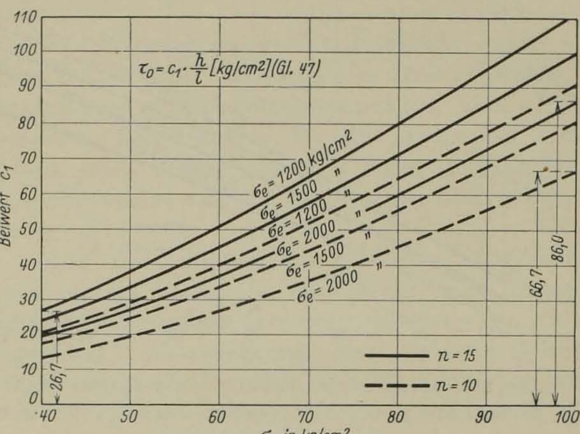

Abb. 24. Darstellung der Beiwerte c_1 zur Ermittlung der Schubspannungen τ_0 von biegebeanspruchten Rechteckquerschnitten bei gegebenen zulässigen Beanspruchungen σ_b/σ_e und gegebenem Schlankheitsverhältnis h/l.

Sie ermöglichen es aber auch, die Begrenzung des Schlankheitsverhältnisses von Balken abzuleiten, damit $\tau_0 = 18$ kg/cm² nicht überschritten wird. Da z. B. für $\sigma = 40/1200$ kg/cm² mit $n = 15$ $c_1 = 26{,}7$ und für $\sigma = 100/2000$ kg/cm² $c_1 = 86{,}0$ beträgt, so errechnet sich diese Begrenzung zu $h/l = 1/1{,}5$ und $h/l = 1/5$. Während das erstgenannte Schlankheitsverhältnis so ungewöhnlich ist, daß es praktisch kaum vorkommen dürfte, erscheint es immerhin bemerkenswert, daß bei Inrechnungstellung von z. B. $\sigma = 100/2000$ kg/cm² die Querschnittshöhe von Balken äußerstenfalls 1/5 der Spannweite betragen darf.

Wird mit $n = 10$ gerechnet, so ermittelt sich z. B. für $\sigma = 100/2000$ kg/cm² $c_1 = 66{,}7$ und damit $h/l = 1/3{,}7$.

Es soll noch auf die Frage eingegangen werden, welcher Bedarf an abgebogenen Eisen notwendig ist, um eine volle Schubsicherung zu erzielen. Um einen Maßstab für diesen Bedarf zu gewinnen, sei derselbe auf den Querschnitt der im Bereiche des größten Feldmomentes erforderlichen Zugeisen bezogen. Beträgt dieser je Breiteneinheit

$$f_e = \frac{\sqrt{M}}{r \cdot \left(1 - \frac{s}{3}\right) \cdot \sigma_e} = \frac{l}{r \cdot \left(1 - \frac{s}{3}\right) \cdot \sigma_e} \cdot \sqrt{\frac{q}{k}}, \tag{48}$$

so ergibt sich der Querschnitt der abgebogenen Eisen, wenn diese mit σ_{e_s} kg/cm² beansprucht werden, zu

$$f_{e_s} = \frac{\tau_0 \cdot l}{4 \cdot \sigma_{e_s} \cdot \sqrt{2}}$$

und mit $\tau_0 = \frac{q \cdot l}{2 \cdot z} = \frac{q \cdot l}{2 \cdot r \cdot \left(1 - \frac{s}{3}\right) \cdot \sqrt{\frac{q \cdot l^2}{k}}} = \frac{\sqrt{q \cdot k}}{2 \cdot r \cdot \left(1 - \frac{s}{3}\right)}$

wird unter der Voraussetzung gleicher zulässiger Eisenbeanspruchungen $\sigma_e = \sigma_{e_s}$

$$(49) \qquad f_{e_s} = \frac{l}{r \cdot \left(1 - \frac{s}{3}\right) \cdot \sigma_{e_s}} \cdot \frac{\sqrt{q \cdot k}}{8 \cdot \sqrt{2}} = \frac{k}{8 \cdot \sqrt{2}} \cdot f_e.$$

Es wird also unabhängig von den jeweils in Rechnung gestellten Beanspruchungen eine volle Schubsicherung erzielt, wenn z. B. für $k = 8$ der Querschnitt der abgebogenen Eisen das 0,71fache, für $k = 24$ jedoch das 2,13fache des Querschnittes der im Bereiche des größten Feldmomentes erforderlichen Zugeisen beträgt. Im letzten Falle sind demnach reichliche Bügel und gegebenenfalls Zulageeisen notwendig.

Nach diesen mehr allgemeinen Erörterungen sei der Frage der Schubsicherheit an Hand von Versuchen nähergetreten.

β) Die Schubsicherheit nach Versuchen.

Der Schubwiderstand einer Eisenbetonkonstruktion hängt bekanntlich vom Schubwiderstand des Betons sowie vom Schubwiderstand der abgebogenen Eisen und der Bügel ab. Dabei ist der Schubwiderstand des Betons in der Hauptsache für den Sicherheitsgrad gegenüber der Schubspannung τ_0' beim Auftreten der ersten Schrägrisse und der Schubwiderstand der abgebogenen Eisen und der Bügel für den Sicherheitsgrad gegenüber der Schubspannung $\tau_{0_{max}}$ unter der Bruchlast maßgebend. Der letztere Schubwiderstand kommt allerdings nur dann zur vollen Geltung, wenn die Verbundfestigkeit zwischen Beton und Eisen groß genug ist, um eine wirkungsvolle Verankerung der abgebogenen Eisen im Beton zu gewährleisten.

Die Güte des verwendeten Betons ist also nicht nur für den erreichbaren Sicherheitsgrad gegenüber dem Auftreten der ersten Schubrisse von erheblichem Einfluß, sie kann es auch für den erreichbaren Sicherheitsgrad gegenüber der unter der Bruchlast vorhandenen Schubspannung sein.

Um zunächst diesen Einfluß möglichst unabhängig von sonstigen Einflüssen klarzustellen, werden nachstehend Versuche an Balken aus gewöhnlichem und hochwertigem Beton behandelt, die keine oder nur wenige Schubsicherungseisen aufweisen. In einem späteren Abschnitt werden weitere Versuche an Balken aus hochwertigem Beton mit teilweiser oder voller Schubsicherung behandelt, die den Einfluß dieser Sicherung auf die erreichbaren Werte $\tau_{0_{max}}$ klarstellen.

Die zunächst zu behandelnden Versuche wurden an den Balken a bis d vorgenommen, die zur Schaffung von Vergleichsmöglichkeiten den gleichen Querschnitt und die gleichen Eiseneinlagen erhielten wie die S. 78 ff. behandelten Balken A bis D (vgl. Abb. 17). Die Balken wiesen jedoch nur eine Länge von 70 cm auf und wurden bei einer Spannweite von 50 cm geprüft. Das Schlankheitsverhältnis h/l betrug also bei den Balken a und b 1/4,9 und 1/2,8, bei den Balken c und d 1/4,5 und 1/3,1.

Die Balken wurden mittels einer zunehmenden Einzellast in Feldmitte in der S. 78 beschriebenen Weise auf Biegung beansprucht. Dabei errechnen sich bei einer zulässigen Gebrauchslast von $P = 735$ kg beim Balken a und von $P = 2320$ kg beim Balken b nach Zustand II mit $n = 15$ die Beanspruchungen $\sigma = 40/1200$ kg/cm², bei einer zulässigen Gebrauchslast von $P = 1780$ kg beim Balken c und von $P = 3640$ kg beim Balken d jedoch die Beanspruchungen $\sigma = 60/1000$ kg/cm².

Die Versuchsanordnung der kurzgespannten Balken geht aus Abb. 25 hervor.