

### 3. Der tatsächliche Sicherheitsgrad.

#### Vorbemerkung.

Die Abweichungen  $\lambda$  zwischen rechnermäßigem und tatsächlichem Bruchmoment bzw. zwischen rechnermäßigem und tatsächlichem Sicherheitsgrad sind in der Hauptsache eine Folge der infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkten Erhöhung des nach Gl. 43 durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e,zul}}$  bestimmten Sicherheitsgrades.

Um ein Bild über die Größe dieser Erhöhung zu gewinnen, werden nachstehend zunächst Versuche mit normalbewehrten, aus gewöhnlichem und hochwertigem Beton hergestellten Balken von verschiedenen Abmessungen behandelt, aus denen der Einfluß der Güte des Betons sowie jener der Querschnittsabmessungen und der Spannweite der Tragwerke auf der Größe dieser Erhöhung zu entnehmen ist. Anschließend werden weitere Versuche mit normal- und stahlbewehrten Balken behandelt, aus denen der Einfluß der Eisensorte auf die Größe dieser Erhöhung hervorgeht.

#### $\alpha$ ) Versuche mit normalbewehrten Balken aus gewöhnlichem und hochwertigem Beton.

Diese vom Verfasser vorgenommenen Versuche wurden an den Balken A bis D mit den in Abb. 17 dargestellten Querschnittsabmessungen und Eiseneinlagen durchgeführt. Die Bewehrungsstärke der verschiedenen hohen Balken A und B betrug 0,56 %, jene der verschiedenen hohen Balken C und D 1,42 %.

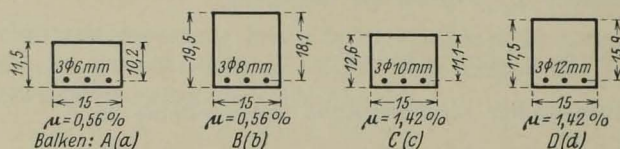


Abb. 17. Querschnitt der Versuchs balken.

Dieselbe entspricht etwa der unteren und oberen Grenze der praktisch üblichen Bewehrungsstärken. Die Balken erhielten eine Länge von 1,2 m und wurden bei 1,0 m Spannweite mittels einer in Feldmitte durch ein Hebelgeschirr aufgebracht zu nehmenden Einzellast auf Biegung beansprucht. Die Lastübertragung auf den jeweils zu prüfenden Balken geschah mit Hilfe einer zwischengeschalteten Stahlkugel, die auf einer untergelegten Stahlplatte ruhte. Damit sollte eine möglichst gleichmäßige Beanspruchung des ganzen Balkenquerschnittes erreicht werden<sup>1)</sup>.

Die Querschnittsabmessungen der Balken wurden so gewählt, daß bei einer zulässigen Gebrauchslast von  $P = 350$  kg beim Balken A und von  $P = 113$  kg beim Balken B mit  $n = 15$  die rechnermäßigen Beanspruchungen  $\sigma = 40/1200$  kg/cm<sup>2</sup>, bei einer zulässigen Gebrauchslast von  $P = 860$  kg beim Balken C und von  $P = 1800$  kg beim Balken D jedoch die Beanspruchungen  $\sigma = 60/1000$  kg/cm<sup>2</sup> vorhanden waren. Von den in jedem Balken vorhandenen 3 Längseisen wurde das mittlere in den Enddritteln unter 45° schräg nach aufwärts abgebogen. Alle Eisen wurden mit Rundhaken im Beton verankert. Bügel wurden nicht verwendet. Die Betondeckschicht betrug durchweg 1 cm.

Die Balken wurden in gehobelter kräftiger Holzschalung hergestellt. 24 Stunden nach der Herstellung derselben wurde die Seitenschalung, 48 Stunden nachher die Bodenschalung entfernt. Die ersten 7 Tage lagerten die Balken unter nassen Tüchern, die übrige Zeit an der Luft. Die Prüfung der Balken erfolgte im Alter von 45 Tagen.

<sup>1)</sup> Die Versuchsanordnung geht aus Abb. 25 hervor [vgl. auch Abb. 21 der früheren Abhandlung des Verfassers (26), S. 87, oder B. u. E. 1929, S. 208, Abb. 3].

Der für die Herstellung der Balken verwendete Beton wurde von Hand gemischt. Das Zuschlagsmaterial wurde vor der Verarbeitung in Sand bis 5 mm Korngröße und in Kies von 5 bis 25 mm Korngröße getrennt und im Verhältnis 2 : 3 wieder gemischt. Die Steife des Betons war durchweg plastisch und ergab nach zehnmalem Aufstoßen des Grafschen Rütteltisches einen Betonkuchen von rd. 50 cm Durchm.<sup>1)</sup>

Um den Einfluß der Betongüte auf die Größe der infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkten Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades feststellen zu können, wurden die Balken sowohl mit dem gewöhnlichen Zement A bei einem Mischungsverhältnis von 250 kg Z/m<sup>3</sup> wie mit dem hochwertigen Zement B bei einem Mischungsverhältnis von 300 kg Z/m<sup>3</sup> hergestellt. Die Normenfestigkeiten dieser Zemente betragen nach 28tägiger gemischter Lagerung

	Druckfestigkeit	Zugfestigkeit
beim Zement A:	394 kg/cm <sup>2</sup>	32,3 kg/cm <sup>2</sup> ,
beim Zement B:	618 kg/cm <sup>2</sup>	40,6 kg/cm <sup>2</sup> .

Die an Würfeln von 20 cm Kantenlänge ermittelte Druckfestigkeit des Betons betrug nach einer Erhärtungszeit von 45 Tagen bei Verwendung  
 des Zementes A: 167 kg/cm<sup>2</sup>,  
 des Zementes B: 282 kg/cm<sup>2</sup>,  
 und die an Balken von 15 auf 15 cm Querschnitt und 70 cm Länge ermittelte Biegezugfestigkeit des Betons nach der gleichen Erhärtungszeit bei Verwendung  
 des Zementes A: 25,4 kg/cm<sup>2</sup>,  
 des Zementes B: 37,8 kg/cm<sup>2</sup>.

Die Festigkeitseigenschaften der Eiseneinlagen sind in Tafel 17, S. 89, zusammengestellt.

Tafel 15 enthält die bei den Balken A bis D als Mittelwert aus je drei Einzelversuchen ermittelten Versuchsergebnisse. Dabei sind die mit dem Zement A hergestellten Balken durch arabische Ziffern, die mit dem Zement B hergestellten Balken durch römische Ziffern gekennzeichnet.

Tafel 15. Vergleich zwischen rechnungsmäßigem und tatsächlichem Sicherheitsgrad von normalbewehrten Balken aus gewöhnlichem und hochwertigem Beton.

$n = 15$ . Spannweite  $l = 1$  m.

Balken	$\sigma_{te20}$ kg/cm <sup>2</sup>	$\mu$ %	$\sigma_s$ kg/cm <sup>2</sup>	Gebrauchslast		Mittlere Rißlast		Mittlere Bruchlast			Sicherheitsgrad		A	Bruchursache
				P kg	$\sigma_b/\sigma_e$ kg/cm <sup>2</sup>	P' kg	$\sigma_{bg}$ kg/cm <sup>2</sup>	P <sub>tmax</sub> kg	$\sigma_b/\sigma_e$ kg/cm <sup>2</sup>	$r_o$ kg/cm <sup>2</sup>	$\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{zul}}}$	$\frac{P_{t\text{max}}}{P}$		
A <sub>1-3</sub>	167	0,56	4130	350	40/1200	450	28,6	1300	142/4260	4,8	3,4	3,7	9	Überschreiten der Streckgrenze der Eiseneinlagen und anschließende Zerstörung des Betons in der Druckzone.
B <sub>1-3</sub>		0,56	3320	1130	40/1200	1400	29,2	3550	123/3700	7,5	2,8	3,1	11	
C <sub>1-3</sub>		1,42	3100	860	60/1000	750	31,9	2850	194/3240	10,3	3,1	3,3	6	
D <sub>1-3</sub>		1,42	3060	1800	60/1000	1550	33,1	6100	202/3360	15,2	3,1	3,4	9	
A <sub>I-III</sub>	282	0,56	4130	350	40/1200	600	38,0	1480	163/4890	5,4	3,4	4,2	23	
B <sub>I u III</sub>		0,56	3320	1130	40/1200	1750	36,4	4050	140/4200	8,5	2,8	3,6	28	
C <sub>I-III</sub>		1,42	3100	860	60/1000	1000	43,8	3120	212/3580	11,2	3,1	3,6	16	
D <sub>I-III</sub>		1,42	3060	1800	60/1000	1950	41,6	6650	220/3680	16,6	3,1	3,7	19	

<sup>1)</sup> Vgl. die Fußnote<sup>1)</sup>, S. 13.

Die Abb. 18a bis h zeigen die Bruchbilder der bis zum vollständigen Bruch belasteten Balken.

Die Bruchursache der Balken  $A_{I-3}$  und  $A_{I-III}$  ist darin zu sehen, daß durch das mit dem Überschreiten der Streckgrenze sich ergebende beträchtliche Dehnen der Eiseneinlagen der jeweils in Feldmitte beobachtete erste Zugriß immer stärker klappte und rasch höher stieg, womit eine erhebliche Einengung der Druckzone und schließlich die Zerstörung des Betons an der oberen Druckkante herbeigeführt wurde (Abb. 18a und b)<sup>1)</sup>. Dabei erfolgte diese Zerstörung bei den Balken aus hochwertigem Beton wesentlich später als bei den Balken aus gewöhnlichem Beton.

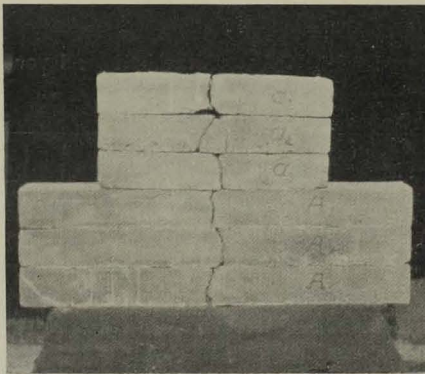
Wie aus Tafel 15 ersichtlich, ergab sich bei den Balken  $A_{I-3}$  eine mittlere Bruchlast von 1300 kg und ein auf das Verhältnis der Bruch- zur Gebrauchslast<sup>2)</sup> bezogener 3,7facher Sicherheitsgrad, bei den Balken  $A_{I-III}$  dagegen eine mittlere Bruchlast von 1480 kg und ein auf das gleiche Verhältnis bezogener 4,2facher Sicherheitsgrad, während der durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmte Sicherheitsgrad lediglich ein 3,4facher war<sup>3)</sup>.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades betrug demnach bei den Balken  $A_{I-3}$  9%, bei den Balken  $A_{I-III}$  jedoch 23%.

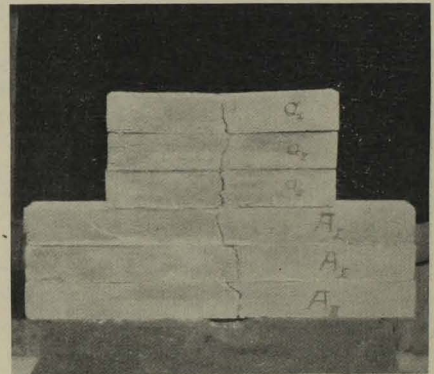
Die letztgenannte Erhöhung ist so überraschend groß, daß zunächst an Hand der weiteren Versuche festgestellt werden soll, ob nicht ein Zufallsergebnis vorliegt.

Die Balken  $B_{I-3}$  und  $B_{Iu,III}$  wiesen die gleiche Bruchursache auf wie die Balken A. Bei diesen Balken ergab sich jedoch die Zerstörung der Druckzone — besonders jene der Balken  $B_{I-3}$  — ausgeprägter wie bei den Balken A, indem die Druckkanten muschelige Ausbrüche zeigten (Abb. 18c und d).

Die Bruchlast des Balkens  $B_{II}$  wich mit  $P = 3450$  kg von jener der Balken  $B_{Iu,III}$  mit 3900 und 4200 kg so erheblich ab, daß sie bei der Mittelwertbildung ausgeschieden



a)

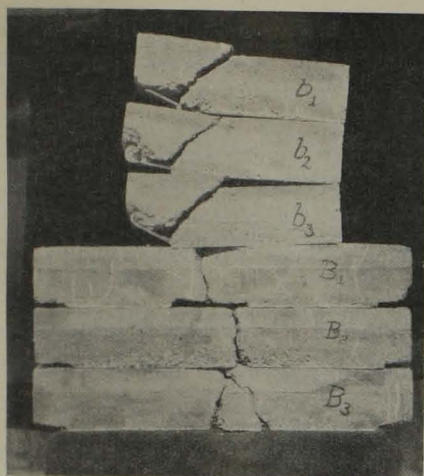


b)

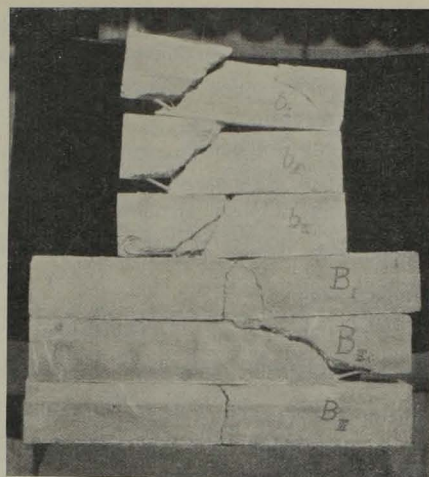
<sup>1)</sup> Die in diesen Abbildungen noch dargestellten kleineren Balken a bis d werden im Abschnitt III, C a 5 behandelt.

<sup>2)</sup> Wegen der geringen Spannweite der Versuchsbalken kann der Sicherheitsgrad genau genug aus dem Verhältnis dieser Lasten abgeleitet werden.

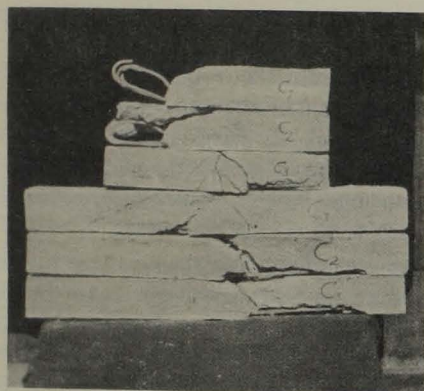
<sup>3)</sup> Diese an sich hohen Sicherheitszahlen sind darauf zurückzuführen, daß die verwendeten Eiseneinlagen eine höhere Streckgrenze aufwiesen, als normalerweise bei Handelseisen anzutreffen ist.



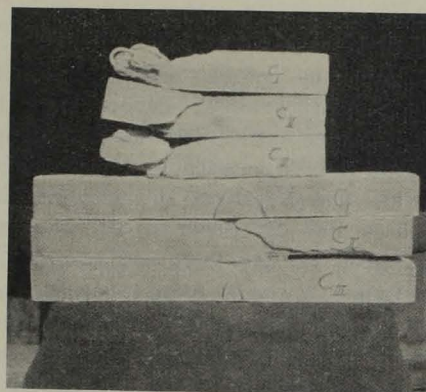
c)



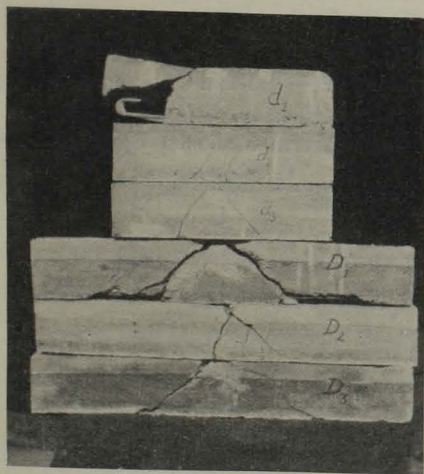
d)



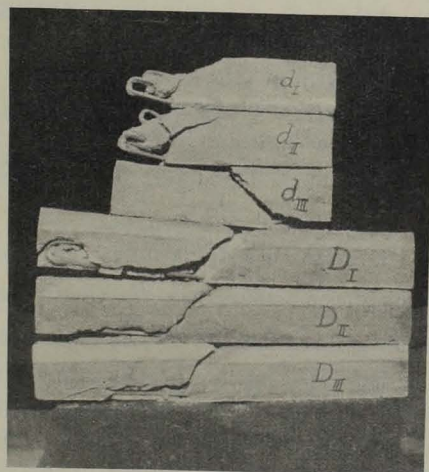
e)



f)



g)



h)

Abb. 18. Bruchrisse der Balken aus gewöhnlichem und hochwertigem Beton.  
Olsen, Sicherheitsgrad.

werden mußte. Der Bruch dieses Balkens erfolgte dadurch, daß ein in dem rechten äußeren Balkenteil beobachteter bis zur Belastungsstelle schräg verlaufender Riß sich mit zunehmender Belastung öffnete und damit ein Verdrehen des äußeren Balkenteiles verursachte.

Bei den Balken  $B_{1-3}$  ergab sich, wie aus Tafel 15 hervorgeht, eine mittlere Bruchlast von 3550 kg und damit ein 3,1facher Sicherheitsgrad, bei den Balken  $B_{Iu,III}$  dagegen eine mittlere Bruchlast von 4050 kg und damit ein 3,6facher Sicherheitsgrad, während der durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmte Sicherheitsgrad lediglich ein 2,8facher war.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades betrug demnach bei den Balken  $B_{1-3}$  11 %, bei den Balken  $B_{Iu,III}$  jedoch 28 %.

Es bestätigt sich also bei diesen Versuchen, daß die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades bei Verwendung von hochwertigem Beton außerordentlich groß sein kann.

Wie aus Tafel 15 ersichtlich, wirkt sich der Einfluß der Querschnittshöhe auf diese Erhöhung dahingehend aus, daß dieselbe bei den höheren Balken  $B_{1-3}$  und  $B_{Iu,III}$  größer ausfällt wie bei den entsprechenden Balken A. Dies ist auf die bei den höheren Balken notwendige Steigerung der Belastung zurückzuführen, die erforderlich ist, um ein derartiges Dehnen der Eiseneinlagen und Klaffen der Zugrisse herbeizuführen, daß der Beton in der Druckzone zerstört wird.

Auch bei den Balken  $C_{1-3}$  und  $C_{I-III}$  ergab sich dieselbe Bruchursache wie bei den Balken A und B. Mit Rücksicht auf die größere Bewehrungsstärke dieser Balken und der damit verbundenen besseren Ausnutzung des Betons wiesen dieselben an der oberen Druckkante teilweise beträchtliche Absplitterungen auf. Wie aus den Abb. 18e und f hervorgeht, weichen die Bruchbilder der Balken  $C_{1-3}$  und  $C_{II}$  von jenen der Balken  $C_{Iu,III}$  dadurch ab, daß sich jeweils in Feldmitte von der Belastungsstelle weg ein schräger Bruchriß öffnete, der sich einseitig nach dem Auflager hin fortsetzte, wobei ein Teil der unteren Betondeckschicht abgesprengt wurde.

Der Tafel 15 ist zu entnehmen, daß sich bei den Balken  $C_{1-3}$  eine mittlere Bruchlast von 2850 kg und damit ein 3,3facher Sicherheitsgrad, bei den Balken  $C_{I-III}$  dagegen eine mittlere Bruchlast von 3120 kg und damit ein 3,6facher Sicherheitsgrad ergab, während der durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmte Sicherheitsgrad lediglich ein 3,1facher war.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades betrug demnach bei den Balken  $C_{1-3}$  6 %, bei den Balken  $C_{I-III}$  jedoch 16 %.

Die letztgenannte Erhöhung muß immer noch als beträchtlich bezeichnet werden, wenn sie auch gegenüber der bei den Balken  $A_{I-III}$  und  $B_{Iu,III}$  ermittelten stark abfällt.

Erhebliche Absplitterungen des Betons an der oberen Druckkante wurden auch bei den Balken  $D_{1-3}$  und  $D_{I-III}$ , deren Zerstörung ebenfalls durch Überschreiten der Streckgrenze der Eiseneinlagen eingeleitet wurde, beobachtet (Abb. 18g und h). Bei

diesen Balken ging der jeweils in Feldmitte vorhandene Bruchriß fast durchweg von der Belastungsstelle weg schräg nach abwärts und setzte sich nach dem Auflager hin fort.

Bei den Balken  $D_{I-3}$  ergab sich, wie aus Tafel 15 hervorgeht, eine mittlere Bruchlast von 6100 kg und damit ein 3,4facher Sicherheitsgrad, bei den Balken  $D_{I-III}$  dagegen eine mittlere Bruchlast von 6650 kg und damit ein 3,7facher Sicherheitsgrad, während der durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{zul}}}$  bestimmte Sicherheitsgrad lediglich ein 3,1facher war.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades betrug demnach bei den Balken  $D_{I-3}$  9%, bei den Balken  $D_{I-III}$  jedoch 19%.

Die letztgenannte Erhöhung war wiederum recht beträchtlich.

Wie ein Vergleich zeigt, hat sich auch bei den höheren Balken  $D_{I-3}$  und  $D_{I-III}$  die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades größer ergeben wie bei den entsprechenden Balken C.

Es sei noch bemerkt, daß die aus Tafel 15 ersichtliche Abnahme dieser Erhöhung bei den Balken C und D gegenüber den entsprechenden Balken A und B zweifellos auf die bei den erstgenannten Balken in Rechnung gestellten erhöhten zulässigen Betondruckspannung und die sich damit ergebende geringere Bruchsicherheit des Betons in der Druckzone dieser Balken zurückzuführen ist.

Wird bei den aus hochwertigem Beton hergestellten Balken A bis D unter Zugrundelegung derselben Gebrauchslast und derselben Querschnittsabmessungen und Eiseneinlagen die Eisenspannung statt mit  $n = 15$  mit  $n = 10$  ermittelt, so errechnet sich bei den Balken A und B  $\sigma_e = 1140 \text{ kg/cm}^2$  und bei den Balken C und D  $\sigma_e = 950 \text{ kg/cm}^2$ . Der durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{zul}}}$  bestimmte Sicherheitsgrad wird damit bei den Balken  $A_{I-III}$  ein 3,6facher, bei den Balken  $B_{Iu,III}$  ein 2,9facher sowie bei den Balken  $C_{I-III}$  und  $D_{I-III}$  ein 3,2facher.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades verringert sich somit bei den Balken  $A_{I-III}$  auf 17%, bei den Balken  $B_{Iu,III}$  auf 24%, bei den Balken  $C_{I-III}$  auf 13% und bei den Balken  $D_{I-III}$  auf 16%.

Diese Erhöhung ergibt sich also auch bei Inrechnungstellung von  $n = 10$  recht beträchtlich.

Um den Einfluß der Spannweite auf die Größe der infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkten Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades festzustellen, wurde gleichzeitig mit den Balken B und D bei gleichbleibenden Querschnittsabmessungen und Eiseneinlagen, aber mit einer Länge von 4,2 m, noch je ein Balken  $B'_1$  und  $D'_1$  aus gewöhnlichem Beton sowie je ein Balken  $B'_1$  und  $D'_1$  aus hochwertigem Beton hergestellt. Diese Balken wurden wie die übrigen Balken gelagert und im Alter von 45 Tagen geprüft, indem sie bei 4,0 m Spannweite in

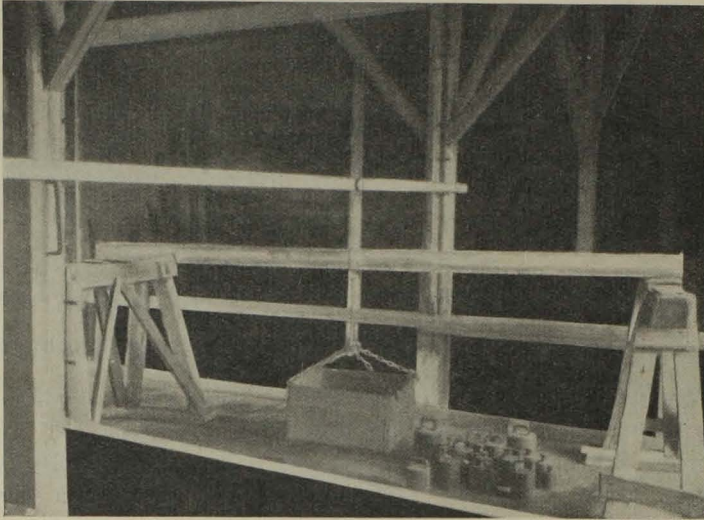


Abb. 19. Versuchsanordnung der weitgespannten Balken.

Feldmitte durch einen als Einzellast wirkenden Gewichtskasten bis zum vollständigen Bruch belastet wurden. Die Versuchsanordnung geht aus Abb. 19 hervor.

Die geprüften Balken wiesen sehr schlanke Abmessungen auf, nachdem die Nutzhöhe der Balken B' nur  $1/22$ , jene der Balken D' sogar nur  $1/25$  der Spannweite betrug.

Werden die Balken B' mit einer zulässigen Gebrauchslast von  $P = 150$  kg belastet, so ergibt sich für die zulässigen Beanspruchungen  $\sigma = 40/1200$  kg/cm<sup>2</sup> unter Berücksichtigung von  $n = 15$  sowie des Momentes aus dem Eigengewicht ein Gebrauchsmoment  $M = 29\,000$  cmkg, während sich bei dem Balken D' mit  $P = 330$  kg für die zulässigen Beanspruchungen  $\sigma = 60/1000$  kg/cm<sup>2</sup>  $M = 45\,500$  cmkg errechnet.

Der Bruch sämtlicher Balken erfolgte durch Überschreiten der Streckgrenze der Eiseneinlagen und anschließende Zerstörung des Betons in der Druckzone.

Tafel 16 enthält die näheren Einzelheiten der Balken sowie die Versuchsergebnisse.

Wie aus Tafel 16 ersichtlich, ergab sich bei den Balken B<sub>1</sub>' und D<sub>1</sub>' eine mittlere Bruchlast von 700 und 1320 kg bzw. ein mittleres Bruchmoment von 84 000 und 144 500 cmkg und damit ein auf das Verhältnis des Bruch- zum Gebrauchsmoment bezogener 2,9- bzw. 3,2facher Sicherheitsgrad, dagegen bei den Balken B<sub>2</sub>' und D<sub>2</sub>' eine mittlere Bruchlast von 860 und 1500 kg bzw. ein mittleres Bruchmoment von 100 000 und 162 500 cmkg und damit ein auf das gleiche Verhältnis bezogener 3,4 bzw. 3,6facher Sicherheitsgrad, während der durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmte Sicherheitsgrad lediglich ein 2,8- bzw. 3,1facher war.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades betrug demnach bei den Balken B<sub>1</sub>' und D<sub>1</sub>' 4 und 3%, bei den Balken B<sub>2</sub>' und D<sub>2</sub>' jedoch 22 und 16%.

Diese Erhöhung ergab sich also geringer als bei den vorbehandelten Balken. Bei den Balken B<sub>1</sub>' und D<sub>1</sub>' ist die Verringerung jedoch unbedeutend.

Zusammengefaßt haben die angeführten Versuche gezeigt, daß die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades bei Verwendung von gewöhnlichem Beton geringfügig, bei Verwendung von hochwertigem Beton jedoch

erstaunlich groß sein kann und sich von den Abmessungen der Tragwerke insofern abhängig erweist, als sie mit abnehmender Querschnittshöhe sowie mit zunehmender Spannweite etwas abnimmt.

Zusammengefaßt ist den angeführten Versuchen zu entnehmen, daß der Sicherheitsgrad von aus hochwertigem Beton hergestellten Platten und Balken um etwa 15 bis 30% größer sein kann, als er sich aus dem Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  ergibt<sup>1)</sup>.

Dieses Ergebnis ist außerordentlich bemerkenswert, nachdem seither im Schrifttum der Güte des bei biegebeanspruchten Tragwerken verwendeten Betons, soweit deren Zerstörung durch Überschreiten der Streckgrenze der Eiseneinlagen eingeleitet wird, hinsichtlich der Frage der Sicherheit solcher Tragwerke keine Bedeutung beigemessen wurde. So wurde z. B. auf der 1927 abgehaltenen Tagung des Deutschen Beton-Vereins (2), S. 59 u. 60, ausgeführt, daß „es keinen Sinn hat, den Beton zu verbessern, wenn die Verbundkonstruktion, auf die es allein ankommt, nicht wegen der Druckfestigkeit, sondern wegen der Zugfestigkeit des Eisens zu Bruch geht“, sowie weiter, daß sich „die höhere Druckfestigkeit beim Bruch nicht auswirkt, solange die Streckgrenze des Eisens Bruchursache ist“<sup>2)</sup>.

Es sei noch bemerkt, daß es nicht ohne weiteres möglich ist, für das Bruchmoment von biegebeanspruchten, aus hochwertigem Beton hergestellten Tragwerken eine Beziehung aufzustellen, welche das jeweils zu erwartende tatsächliche Moment auch nur einigermaßen erfaßt. Dies ist auf die bereits erwähnte Tatsache zurückzuführen, daß die im Zustand III auftretenden Formänderungen der Tragwerke auch nicht angenähert bestimmbar sind.

<sup>1)</sup> Dieses Ergebnis läßt sich auch an Hand sonstiger Versuche mit Balken aus hochwertigem Beton nachweisen, z. B. an Hand jener des Heftes 33 des D. A. f. E.; Voraussetzung ist nur, daß die Balken auch tatsächlich bis zum vollständigen Bruch belastet wurden.

<sup>2)</sup> Auch in dem kürzlich erschienenen Heft 66 des D. A. f. E. wird auf Grund der vorgenommenen Versuche gefolgert, daß „die Druckfestigkeit des Betons selbst ohne wesentlichen Einfluß auf die Bruchlast bleibt“. Es wird noch gezeigt, daß diese Folgerung wegen unvollständiger Auswertung der Versuche nicht zutrifft (vgl. S. 94).

Tafel 16. Vergleich zwischen rechnungsmäßigem und tatsächlichem Sicherheitsgrad von normalbewehrten Balken aus gewöhnlichem und hochwertigem Beton.

$n = 15$ . Spannweite  $l = 4,0$  m.

Balken	$\sigma_{b_{20}}$ kg/cm <sup>2</sup>	$\mu$ %	$\sigma_s$ kg/cm <sup>2</sup>	Gebrauchslast bzw. -moment			Rißlast $P'$ kg	$\sigma_{b_2}$ kg/cm <sup>2</sup>	Bruchlast bzw. -moment			Sicherheitsgrad		Bruchursache		
				$P$ kg	$M$ cmkg	$\sigma_b/\sigma_e$ kg/cm <sup>2</sup>			$P_{t_{max}}$ kg	$M_{t_{max}}$ cmkg	$\sigma_b/\sigma_e$ kg/cm <sup>2</sup>	$\tau_0$ kg/cm <sup>2</sup>	$\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$		$\frac{M_{t_{max}}}{M}$	$\frac{P_{t_{max}}}{P}$
$B'_1$	167	0,56	3320	150	29 000	40/1200	170	26,6	700	84 000	116/3480	2,0	2,8	2,9	4,7	Überschreiten der Streckgrenze der Eiseneinlagen und anschließende Zerstörung des Betons in der Druckzone.
$D'_1$		1,42	3060	330	45 500	60/1000	210	29,8	1320	144 500	196/3280	3,9	3,1	3,2	4,0	
$B'_1$	282	0,56	3320	150	29 000	40/1200	320	39,2	860	100 000	138/4150	2,4	2,8	3,4	5,7	Überschreiten der Streckgrenze der Eiseneinlagen und anschließende Zerstörung des Betons in der Druckzone.
$D'_1$		1,42	3060	330	45 500	60/1000	310	37,2	1500	162 500	216/3600	4,3	3,1	3,6	4,6	



Es soll noch auf die bei den weitgespannten Balken sich ergebenden hohen Sicherheitszahlen hingewiesen werden, wenn der Sicherheitsgrad auf das Verhältnis der Bruch- zur Gebrauchslast bezogen wird. So ergab sich, auf dieses Verhältnis bezogen, bei den Balken  $B'_1$  und  $D'_1$  ein 4,7- und 4,0facher, bei den Balken  $B_1$  und  $D_1$  sogar ein 5,7- und 4,6facher Sicherheitsgrad.

Der auf das Verhältnis der Bruch- zur Gebrauchslast bezogene Sicherheitsgrad wird also bei weitgespannten Tragwerken vorteilhaft beeinflusst. Diese Feststellung spricht für die Ausführung solcher Tragwerke besonders in den Fällen, in denen Überlastungen zu erwarten sind, z. B. bei Decken in Fabrik- und Lagerräumen. Eine im Verhältnis zur Gebrauchslast unnötige Steigerung des Eigengewichtes läßt sich dabei dadurch vermeiden, daß die zulässigen Beanspruchungen weitgehend erhöht werden.

Dies geht aus früheren Ausführungen des Verfassers (26), S. 30, hervor. Nach denselben können die Spannweiten von biegebeanspruchten Platten und Balken bei gleichbleibender Querschnittshöhe, wie sie z. B. beim Bemessen mit  $\sigma = 40/1200$  kg/cm<sup>2</sup> ermittelt wurde, und bei gleichbleibender Gebrauchslast infolge Erhöhung der zulässigen Beanspruchungen z. B. auf  $\sigma = 60/1500$  kg/cm<sup>2</sup> um das 1,3fache, auf  $\sigma = 100/2000$  kg/cm<sup>2</sup> sogar um das 1,8fache vergrößert werden.

Der Ausführung von weitgespannten Tragwerken ist allerdings dadurch eine Grenze gesetzt, daß die bei zu schlanken Abmessungen auftretenden Durchbiegungen zu groß werden können. Die Biegesteifigkeit solcher Tragwerke läßt sich jedoch durch die Verwendung von hochwertigem Beton beträchtlich steigern.

In welchem Ausmaße dies der Fall ist, geht z. B. aus den vorbehandelten Versuchen hervor, nachdem bei den Balken  $B'_1$  und  $D'_1$  unter der Gebrauchslast Durchbiegungen von 1,86 und 4,4 mm, bei den Balken  $B_1$  und  $D_1$  jedoch Durchbiegungen von 3,22 und 6,2 mm ermittelt wurden. Während also die Durchbiegungen der erstgenannten Balken rd.  $1/2100$  und  $1/900$  der Spannweite betragen, vergrößerten sich dieselben bei den letztgenannten Balken auf rd.  $1/1200$  und  $1/650$  der Spannweite.

Auf die in den Tafeln 15 und 16 enthaltenen Angaben über die Rißlasten  $P'$  wird später noch eingegangen. Die Schubspannungen  $\tau_0$  der Balken waren im Durchschnitt gering. Es wurden auch keinerlei Schubrisse beobachtet.

In den weiteren Ausführungen soll der Einfluß der Eisensorte auf die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkten Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{ezul}}$  bestimmten Sicherheitsgrades gezeigt werden, indem die Versuchsergebnisse von normal- und stahlbewehrten Balken aus hochwertigem Beton miteinander verglichen werden.

### β) Versuche mit normal- und stahlbewehrten Balken aus hochwertigem Beton.

Die Frage der praktischen Verwendungsmöglichkeit von Bewehrungsseisen aus hochwertigem Stahl hat mit dem Aufkommen der hochwertigen Zemente erhöhte Beachtung gefunden. So wurde in den letzten Jahren eine Reihe von Versuchen durchgeführt, um zu dieser Frage Stellung nehmen zu können. Bekannt sind die Versuche von Deppe (31), Emperger (6), Geßner (33 und 34), Nowak (33), Otzen (42), Saliger (45) und Skall (47)<sup>1)</sup>. Von älteren Versuchen sind jene der Firma Kossel & Co. (32) und jene von Möller (37) zu nennen.

<sup>1)</sup> Auf die in neuester Zeit in Heft 66 des D. A. f. E. veröffentlichten Versuche mit stahlbewehrten Balken wird u. a. S. 94 eingegangen.

Fast alle diese Versuche sind insofern nicht erschöpfend genug, als aus ihnen unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen weder der Einfluß verschiedener Eisensorten noch jener verschiedener Güte des verwendeten Betons auf die Tragfähigkeit zu entnehmen ist. Selbst bei den musterhaft durchgeführten Versuchen von Saliger (45) ist ein direkter Vergleich der Versuchsergebnisse dadurch erschwert, daß gleichzeitig mit der Verwendung verschiedener Eisensorten der verarbeitete Beton, einesteiis wegen der Verwendung verschiedener Zementsorten, andernteils aber wegen der Prüfung der Versuchskörper in verschiedenen Altersstufen, hinsichtlich der Festigkeit erhebliche Schwankungen aufwies.

Da es auch nicht möglich ist, die seither vorliegenden Versuche wegen verschiedener Baustoffe, Belastungsarten und Spannweiten nach den genannten Gesichtspunkten unmittelbar untereinander zu vergleichen, ergab sich die Notwendigkeit, eigene Versuche durchzuführen.

Die Notwendigkeit der Vornahme solcher Versuche ergab sich aber auch deshalb, weil bei den vorliegenden Versuchsergebnissen Widersprüche vorhanden sind, die der Klärung bedürfen. So ermittelt sich bei den von Möller (37) durchgeführten Versuchen z. B. an den normal- und stahlbewehrten Platten III/4 und III/5 nach entsprechender Umrechnung der verschiedenen Querschnitte derselben, daß die Tragfähigkeit der stahlbewehrten Platte gegenüber jener der normalbewehrten Platte nur um 10 % größer war, obwohl die Streckgrenze der Stahleinlagen jene der normalen Eiseneinlagen um 35 % überschritt. Bei anderen Versuchen wurde dagegen ermittelt, daß die Tragfähigkeit etwa im Verhältnis der höheren Streckgrenze zunimmt.

Ein weiterer, bei den vorliegenden Versuchsergebnissen vorhandener Widerspruch bezieht sich auf die Haftfestigkeit des Betons an den Stahleinlagen. Mit Rücksicht auf die im allgemeinen vorhandene glatte Oberfläche von derartigen Eiseneinlagen erscheint es nämlich fraglich, ob eine ausreichende Haftfestigkeit vorhanden ist. So wurden z. B. bei den Versuchen von Skall (47) mit stahlbewehrten Balken Zerstörungen beobachtet, die einwandfrei auf die Überwindung der Haftfestigkeit des Betons an den Stahleinlagen zurückzuführen sind. Skall folgert auch aus seinen Versuchen, daß dieselben „zur Vorsicht mahnen bei Verwendung von Stahleinlagen als Bewehrung für Bauteile aus hochwertigem Portlandzementbeton mit Rücksicht auf die Haftfestigkeit“. Im Gegensatz hierzu wurden jedoch bei sonstigen Versuchen mit stahlbewehrten Balken keinerlei auf eine derartige Ursache zurückzuführende Zerstörungen beobachtet.

Die nachstehend behandelten Versuche des Verfassers an biegebeanspruchten Balken hatten neben der Klarstellung obiger Widersprüche in der Hauptsache den Zweck, darüber Aufschluß zu gewinnen

- a) inwieweit sich unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen der auf eine noch näher festzulegende zulässige Gebrauchslast bzw. auf ein noch näher festzulegendes zulässiges Gebrauchsmoment bezogene Sicherheitsgrad bei Verwendung einer Stahlbewehrung gegenüber der Verwendung einer normalen Bewehrung erhöht sowie
- b) inwieweit die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{ zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades bei Verwendung einer Stahlbewehrung gegenüber der Verwendung einer normalen Bewehrung beeinflußt werden kann.

Die Versuche wurden an den in Abb. 20 im Querschnitt dargestellten Balken A bis E durchgeführt. Die aus dieser Abbildung ersichtliche Bewehrungsstärke der Balken schwankte zwischen 0,23 und 2,3 ‰. Die Balken wiesen eine Länge von 1,2 m auf und wurden bei 1,0 m Spannweite durch eine zunehmende Einzellast in Feldmitte in der bereits beschriebenen Weise auf Biegung beansprucht.

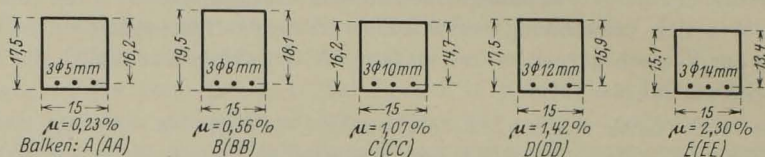


Abb. 20. Querschnitt der Versuchsbalken.

Die Querschnittsabmessungen der Balken wurden so gewählt, daß unter der Gebrauchslast  $P$  nach Zustand II mit  $n = 15$  folgende Beanspruchungen vorhanden waren:

beim Balken A mit $P = 640$ kg	$\sigma = 40/2000$ kg/cm <sup>2</sup>
„ „ B „ $P = 1130$ „	$\sigma = 40/1200$ „
„ „ C „ $P = 2350$ „	$\sigma = 100/2000$ „
„ „ D „ $P = 3600$ „	$\sigma = 120/2000$ „ und
„ „ E „ $P = 2400$ „	$\sigma = 100/1200$ „

Die gewählten Querschnittsabmessungen und Eiseneinlagen ermöglichen es also, den Sicherheitsgrad der Balken sowohl bei gleichbleibender zulässiger Betondruckspannung und zunehmender Eisenzugspannung wie bei gleichbleibender zulässiger Eisenzugspannung und zunehmender Betondruckspannung zu vergleichen.

Von den in jedem Balken vorhandenen 3 Längseisen wurde jeweils das mittlere in den Enddritteln unter 45° schräg nach aufwärts abgebogen. Alle Eisen wurden mit Rundhaken im Beton verankert. Bügel wurden nicht verwendet. Die Betondeckschicht betrug durchweg 1 cm.

Die Herstellung und Lagerung der Balken geschah in derselben Weise wie bei den S. 78 beschriebenen Versuchen. Verwendet wurde der hochwertige Zement C, der nach 28tägiger gemischter Lagerung eine Normdruckfestigkeit von 643 kg/cm<sup>2</sup> und eine Normzugfestigkeit von 49,6 kg/cm<sup>2</sup> aufwies. Das Mischungsverhältnis wurde zu 300 kg Z/m<sup>3</sup> gewählt.

Die an Würfeln von 20 cm Kantenlänge ermittelte Druckfestigkeit des Betons betrug nach einer Erhärtungszeit von 45 Tagen 264 kg/cm<sup>2</sup>, die an Balken von 15 auf 15 auf 70 cm ermittelte Biegezugfestigkeit nach der gleichen Erhärtungszeit 46,6 kg/cm<sup>2</sup>.

Von jeder Querschnittsform wurden 2 Balken mit handelsüblichem Flußeisen sowie 2 Balken mit hochwertigem Baustahl bewehrt. Es gelangten also 20 Balken zur Herstellung, von welchen die mit normalen Eisen bewehrten mittels einfacher Buchstaben (z. B. A), die mit hochwertigem Stahl bewehrten mittels doppelter Buchstaben (z. B. AA) bezeichnet wurden.

Von den zu den Balken verwendeten Eiseneinlagen wurde mittels besonderer Vorversuche die Streckgrenze  $\sigma_s$ , die Zugfestigkeit  $\sigma_z$  sowie die Bruchdehnung  $\epsilon_B$  bestimmt. Tafel 17 enthält die Versuchsergebnisse, wobei jeweils der Mittelwert aus zwei Versuchen gebildet wurde.

Die aus der Tafel ersichtlichen größeren Werte für die Streckgrenze und die Zugfestigkeit der Rundeisen mit geringerem Durchmesser ist bekanntlich auf das gleichmäßigere Walzen dieser Eisen zurückzuführen.

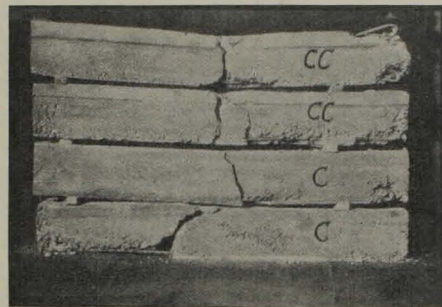
Tafel 18 enthält die bei den Balken im Alter von 45 Tagen ermittelten Versuchsergebnisse. Die Abb. 21a bis e geben die Bruchbilder der bis zum vollständigen Bruch belasteten Balken wieder.

Der Bruch der Balken A und AA wurde durch Überschreiten der Streckgrenze der Eiseneinlagen eingeleitet. Dabei stieg der jeweils in Feldmitte beobachtete erste Zugriß unter Einengung der Druckzone rasch hoch, bis eine vollständige Trennung des Querschnittes herbeigeführt wurde (Abb. 21a).

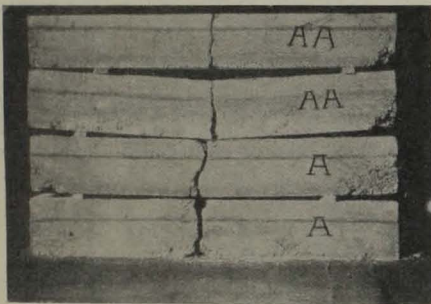
Wie aus Tafel 18 ersichtlich, betrug die mittlere Bruchlast der Balken A 2200 kg, jene der Balken AA 3000 kg. Für die Zulassung von  $\sigma = 40/2000 \text{ kg/cm}^2$  mit  $P = 640 \text{ kg}$

Tafel 17. Festigkeitseigenschaften der verwendeten Eiseneinlagen.

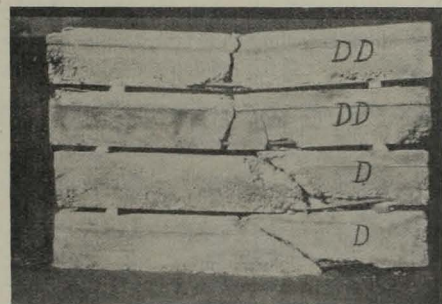
Eisen- durchmesser in mm	Flußeisen			Baustahl		
	$\sigma_s$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_g$ kg/cm <sup>2</sup>	$\epsilon_B$ %	$\sigma_s$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_g$ kg/cm <sup>2</sup>	$\epsilon_B$ %
5	5240	7500	27	6940	8040	19
6	4130	6200	25	—	—	—
8	3320	5100	26	4200	5620	23
10	3100	4660	24	4160	5480	21
12	3060	4550	26	4080	5410	21
14	3120	4600	28	3890	5300	24



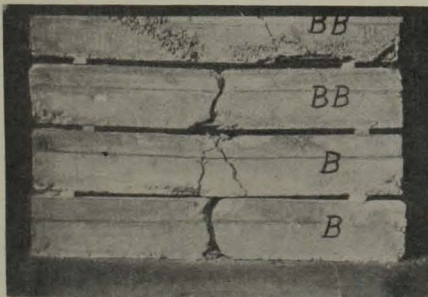
c)



a)



d)



b)



e)

Abb. 21. Bruchrisse der normal- und stahlbewehrten Balken aus hochwertigem Beton.

Tafel 18.

Vergleich zwischen rechnungsmäßigem und tatsächlichem Sicherheitsgrad von normal- und stahlbewehrten Balken aus hochwertigem Beton.

 $n = 15$ . Spannweite  $l = 1,0$  m.

Bal- ken	$\sigma_{1020}$ kg/cm <sup>2</sup>	$\mu$ %	$\sigma_s$ kg/cm <sup>2</sup>	Gebrauchslast		Mitt- lere Riß- last $P'$ kg	$\sigma_{bz}$ kg/cm <sup>2</sup>	Risse- sicher- heit $\frac{P'}{P}$	Bruchlast				Sicherheits- grad		$A$ %	$\frac{\sigma_s}{\sigma_s}$ (Stahl)  (Flußeisen)	$\frac{P_{tmax}}{P_{tmax}}$ (Stahl)  (Flußeisen)	Bruchursache	
				$P$ kg	$\sigma_b/\sigma_e$ kg/cm <sup>2</sup>				$P_{tmax}$ in kg		$\sigma_b/\sigma_e$ kg/cm <sup>2</sup>	$\tau_0$ kg/cm <sup>2</sup>	$\tau_1$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_s$ $\sigma_{ezul}$					$P_{tmax}$ $P$
									Einzel- werte	Mittel- wert									
A	264	0,23	5240	640	40/2000	1700	45,2	2,7	2150 2250	2200	132/6600	5,1	12,2	2,6	3,4	31	1,32	1,36	Überschreiten der Streckgrenze der Eiseneinlagen und anschließende Zer- störung des Betons in der Druckzone.
AA			6940			1550	41,1	2,4	2900 3100	3000	179/8950	6,9	16,4	3,5	4,7	34			
B	0,56	3320	1130	40/1200	2100	45,5	1,9	3850 4150	4000	140/4200	8,6	11,5	2,8	3,5	25	1,26	1,28		
BB		4200			2300	52,2	2,0	5000 5200	5100	175/5250	10,7	14,4	3,5	4,5	29				
C	1,07	3100	2350	100/2000	1950	54,0	0,8	4100 4300	4200	177/3540	11,3	13,6	1,6	1,8	16	1,34	1,39		
CC		4160			1800	50,2	0,8	5800 5900	5850	247/4640	15,8	18,8	2,1	2,5	19				
D	1,42	3060	3600	120/2000	2600	46,2	0,7	6050 6150	6100	201/3360	15,4	15,3	1,5	1,7	13	1,33	1,34		
DD		4080			2800	50,5	0,8	8200 8200	8200	270/4500	20,6	20,5	2,0	2,3	15				
E	2,30	3120	2400	100/1200	2450	62,8	1,0	6400 6400	6400	264/3200	19,8	17,6	2,6	2,7	4	1,25	1,08		
EE		3890			2250	57,8	0,9	6800 7000	6900	284/3440	21,3	18,1	3,2	2,9	—			Überwindung der Haftfestigkeit des Betons an den Eiseneinlagen.	

ergibt sich demnach bei den Balken A ein auf das Verhältnis der Bruch- zur Gebrauchslast<sup>1)</sup> bezogener 3,4facher, bei den Balken AA dagegen ein 4,7facher Sicherheitsgrad. Der Sicherheitsgrad der stahlbewehrten Balken war also um das 1,36fache<sup>2)</sup> größer als jener der normalbewehrten Balken, während sich aus dem Verhältnis der Streckgrenzen der zu diesen Balken verwendeten Eiseneinlagen eine 1,32fache Zunahme des Sicherheitsgrades ergibt. Bei gleichbleibenden Querschnittsbeanspruchungen nahm also der Sicherheitsgrad etwa im Verhältnis der höheren Streckgrenze zu.

Der durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmte Sicherheitsgrad war demgegenüber ein 2,6- und 3,5facher.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades betrug demnach bei den Balken A 31<sup>0</sup>/<sub>10</sub>, bei den Balken AA 34<sup>0</sup>/<sub>10</sub>.

Diese Erhöhung war demnach außerordentlich groß<sup>3)</sup>.

Bei den Balken B und BB ergab sich die gleiche Bruchursache wie bei den Balken A und AA. Die Zerstörung der Druckzone zeigte sich jedoch ausgeprägter, indem sich muschelige Ausbrüche bildeten (Abb. 21b). Bei einem der Balken BB wurde, allerdings erst in der Nähe der Bruchlast, einseitig ein Haftriß beobachtet, durch den schließlich ein Teil der unteren Betondeckschicht abgesprengt wurde.

Die mittlere Bruchlast der Balken B betrug 4000 kg, jene der Balken BB 5100 kg (vgl. Tafel 18). Für die Zulassung von  $\sigma = 40/1200 \text{ kg/cm}^2$  mit  $P = 1130 \text{ kg}$  ermittelt sich demnach bei den Balken B ein 3,5facher, bei den Balken BB dagegen ein 4,5facher Sicherheitsgrad. Der Sicherheitsgrad der stahlbewehrten Balken war also um das 1,28fache größer als jener der normalbewehrten Balken, während sich aus dem Verhältnis der Streckgrenzen der zu diesen Balken verwendeten Eiseneinlagen eine 1,26fache, also eine etwa verhältnismäßige Zunahme errechnet.

Der durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmte Sicherheitsgrad war demgegenüber ein 2,8- und 3,5facher.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades betrug demnach bei den Balken B 25<sup>0</sup>/<sub>10</sub>, bei den Balken BB 29<sup>0</sup>/<sub>10</sub>.

Auch diese Erhöhung war außerordentlich groß.

Die Bruchursache der Balken C und CC ist wiederum dieselbe wie bei den vorbehandelten Balken. Mit Rücksicht auf die größere Bewehrungsstärke dieser Balken und der damit verbundenen besseren Ausnutzung des Betons wiesen dieselben, besonders bei den stahlbewehrten Balken, in der Druckzone beträchtliche Absplitterungen auf (Abb. 21c). Bei einem der Balken C erfolgte der Bruch derart, daß sich ein von der Belastungsstelle weg schräg nach links verlaufender Riß längs der Eiseneinlagen nach dem Auflager hin fortsetzte, wobei durch die mit dem Öffnen dieses Risses verbundene

<sup>1)</sup> Vgl. Fußnote <sup>2)</sup>, S. 80.

<sup>2)</sup> In Tafel 18 ist diese Vergrößerung des Sicherheitsgrades durch das Verhältnis der Bruchlasten  $P_{t_{\max}}$  (Stahl) und  $P_{t_{\max}}$  (Flußeisen) der stahl- und normalbewehrten Balken zum Ausdruck gebracht.

<sup>3)</sup> Auch bei sonstigen Versuchen mit schwach bewehrten Balken läßt sich diese Erhöhung als beträchtlich nachweisen, z. B. bei den mit 2 Rundeisen von 5 mm Durchm. bewehrten Balken der Versuche von Tetmajer (36).

Verdrehung des äußeren Balkenteiles die Eiseneinlagen nach unten gedrückt und ein Teil der Betondeckschicht abgesprengt wurde. Das aus den Bruchbildern der Balken CC ersichtliche Fehlen eines Teiles der unteren Betondeckschicht ist eine Folge von Haftrissen, die allerdings erst in der Nähe der Bruchlast beobachtet wurden<sup>1)</sup>. Die rechnermäßige, in vorgeschriebener Weise (D. B. § 21) ermittelte Haftspannung betrug dabei  $\tau_1 = 18,8 \text{ kg/cm}^2$ . Auch das in Abb. 21c besonders bei den Balken CC ersichtliche Auseinandersprennen des Betons an den Stirnflächen in der Nähe der Verankerungsstellen der Eiseneinlagen wurde erst kurz vor dem vollständigen Bruch beobachtet. Es ist darauf zurückzuführen, daß der Beton der durch die Rundhaken der abgelenkten Eisen auf ihn wirkenden großen Zugkraft nicht mehr standhielt.

Wie aus Tafel 18 hervorgeht, wurde die mittlere Bruchlast der Balken C mit 4200 kg, jene der Balken CC mit 5850 kg ermittelt. Für die Zulassung von  $\sigma = 100/2000 \text{ kg/cm}^2$  mit  $P = 2350 \text{ kg}$  ergibt sich demnach bei den Balken C ein 1,8facher, bei den Balken CC dagegen ein 2,5facher Sicherheitsgrad. Der Sicherheitsgrad der stahlbewehrten Balken war also um das 1,39fache größer als jener der normalbewehrten Balken, während sich aus dem Verhältnis der Streckgrenzen der zu diesen Balken verwendeten Eiseneinlagen eine 1,34fache, also eine etwa verhältnismäßige Zunahme ermittelt.

Der durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmte Sicherheitsgrad war demgegenüber ein 1,6- und 2,1facher.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades betrug demnach bei den Balken C 16%, bei den Balken CC 19%.

Die erhebliche Abnahme dieser Erhöhung gegenüber den vorbehandelten Balken ist darauf zurückzuführen, daß die der Querschnittsbemessung dieser Balken zugrunde gelegte zulässige Betondruckspannung von  $100 \text{ kg/cm}^2$  bereits so groß ist, daß in der Druckzone der Balken kein wesentlich höherer Sicherheitsgrad mehr vorhanden ist als in der Zugzone.

Bei den Balken D und DD wurde der Bruch gleichfalls durch Überschreiten der Streckgrenze der Eiseneinlagen und darauffolgende beträchtliche Absplitterungen des Betons in der Druckzone herbeigeführt (Abb. 21d). Das aus den Bruchbildern der Balken D ersichtliche Fehlen eines Teiles der unteren Betondeckschicht ist auf die gleiche Ursache, wie sie für einen der vorbehandelten Balken C geschildert wurde, zurückzuführen. Dagegen ist das aus den Bruchbildern der Balken DD ersichtliche Fehlen eines Teiles der unteren Betondeckschicht zweifellos eine Folge der allerdings erst in der Nähe der Bruchlast beobachteten Haftrisse. Dabei ergab sich die Haftspannung zu  $\tau_1 = 20,5 \text{ kg/cm}^2$ . Das ebenfalls erst in der Nähe der Bruchlast beobachtete Auseinandersprennen des Betons an den Stirnflächen der Balken DD ist auf die gleiche Ursache, wie sie bei den Balken CC geschildert wurde, zurückzuführen.

Die mittlere Bruchlast der Balken D betrug 6100 kg, jene der Balken DD 8200 kg. Für die Zulassung von  $\sigma = 120/2000 \text{ kg/cm}^2$  mit  $P = 3600 \text{ kg}$  ermittelt sich demnach bei den Balken D ein 1,7facher, bei den Balken DD dagegen ein 2,3facher Sicherheitsgrad. Der Sicherheitsgrad der stahlbewehrten Balken war also um das 1,34fache

<sup>1)</sup> Diese Haftrisse wurden jeweils an der Seiten- oder Unterfläche der Balken als Längsrisse beobachtet, die vom Gleiten der Eiseneinlagen im Beton herrühren und die Auflösung des Verbundes anzeigen.

größer als jener der normalbewehrten Balken, während sich aus dem Verhältnis der Streckgrenzen der zu diesen Balken verwendeten Eiseneinlagen eine 1,33fache, also verhältnismäßige Zunahme ergibt.

Der durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmte Sicherheitsgrad war demgegenüber ein 1,5- und 2,0facher.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades betrug demnach bei den Balken D 13%, bei den Balken DD 15%.

Diese Erhöhung war also geringer wie jene bei den Balken C, was wegen der bei der Querschnittsbemessung dieser Balken in Rechnung gestellten außerordentlich hohen zulässigen Betondruckspannung von 120 kg/cm<sup>2</sup> zu erwarten war.

Der Bruch der Balken E erfolgte, wie z. B. bei den Balken D, durch Überschreiten der Streckgrenze der Eiseneinlagen und die darauffolgenden Absplitterungen des Betons in der Druckzone sowie — infolge der Verdrehung des äußeren Balkenteiles — in einem Teil der unteren Deckschicht (Abb. 21e). Bei den Balken EE erfolgte der Bruch dadurch, daß die Haftfestigkeit des Betons an den Eiseneinlagen in den äußeren Balkendritteln schon vor dem Erreichen der Streckgrenze der Eiseneinlagen überwunden wurde. Dabei betrug  $\tau_1 = 18,1$  kg/cm<sup>2</sup>.

Die mittlere Bruchlast der Balken E wurde mit 6400 kg, jene der Balken EE mit 6900 kg ermittelt. Für die Zulassung von  $\sigma = 100/1200$  kg/cm<sup>2</sup> mit  $P = 2400$  kg ergibt sich demnach bei den Balken E ein 2,7facher, bei den Balken EE ein 2,9facher Sicherheitsgrad. Der Sicherheitsgrad der stahlbewehrten Balken war also nur um das 1,08fache größer als jener der normalbewehrten Balken, während sich aus dem Verhältnis der Streckgrenzen der zu diesen Balken verwendeten Eiseneinlagen eine 1,25fache Zunahme ermittelt.

Der durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmte Sicherheitsgrad war demgegenüber ein 2,6- und 3,2facher.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades betrug demnach bei den Balken E 4%, während derselbe bei den Balken EE wegen des vorzeitigen Bruches um 10% unterschritten wurde.

Zusammengefaßt ist den angeführten Versuchen — mit Ausnahme jener der Balken E und EE — zunächst zu entnehmen, daß sich unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen der auf eine bestimmte Gebrauchslast bzw. auf ein bestimmtes Gebrauchsmoment bezogene Sicherheitsgrad bei Verwendung einer Stahlbewehrung gegenüber der Verwendung einer normalen Bewehrung etwa im Verhältnis der höheren Streckgrenze größer wird.

Wie ein Vergleich der Werte für  $\lambda$  in Tafel 18 zeigt, ist den Versuchen weiter zu entnehmen, daß die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades bei Verwendung einer Stahlbewehrung etwas größer sein kann als bei Verwendung einer normalen Bewehrung. Dieses bemerkenswerte Ergebnis ist darauf zurückzuführen, daß der verwendete hochwertige Stahl eine weniger ausgeprägte Streckgrenze aufwies als das verwendete Fluß-





eisen und er sich deshalb beim Überschreiten der Streckgrenze zunächst weniger streckte. Damit war eine Steigerung der Last nötig, um ein derartiges Dehnen der Eiseneinlagen und Klaffen des Bruchrisses zu erzielen, daß der Beton in der Druckzone zerstört wurde<sup>1)</sup>.

Was die Größe der infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkten Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades selbst anbetrifft, so ergab sich dieselbe auch bei den in diesem Abschnitt behandelten Balken erstaunlich groß und schwankte zwischen 13 und 34<sup>0</sup>/<sub>0</sub>.

Es sei in diesem Zusammenhange darauf hingewiesen, daß sich eine derartige Erhöhung auch bei den in Heft 66 des D. A. f. E. angeführten Versuchen mit stahlbewehrten Balken nachweisen läßt. Für einen derartigen Nachweis ist es allerdings erforderlich, die in Tafel 22 des genannten Heftes angeführten Eisenspannungen unter der Bruchlast der verwendeten Rechteckbalken richtigzustellen, nachdem bei ihrer Ermittlung das nicht unerhebliche Eigengewicht der Balken unberücksichtigt blieb. Wird dieses berücksichtigt, so erhöhen sich die Eisenspannungen

bei den Balken der Reihe 1R von $\sigma_{e_{max}} = 3000$ auf $3380 \text{ kg/cm}^2$	
" " " " " 2R " "	= 3410 " 3790 "
" " " " " 3R " "	= 3120 " 3500 "
" " " " " 4R " "	= 3900 " 4315 "
" " " " " 5R " "	= 4050 " 4465 "
" " " " " 6R " "	= 4220 " 4560 "
" " " " " 7R " "	= 3980 " 4480 "
" " " " " 8R " "	= 4400 " 4900 " und
" " " " " 9R " "	= 4250 " 4730 " .

Da die Streckgrenze des zur Bewehrung der Balken der Reihe 1R bis 3R verwendeten Flußeisens St 37  $2950 \text{ kg/cm}^2$  und des zur Bewehrung der übrigen Balken verwendeten Baustahls St 48  $3770 \text{ kg/cm}^2$  betrug, ergibt sich die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades

bei den Balken der Reihe 1R zu 14 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> (Beton a)	
" " " " " 2R " 28 " ( " b)	
" " " " " 3R " 19 " ( " c)	
" " " " " 4R " 14 " ( " a)	
" " " " " 5R " 18 " ( " b)	
" " " " " 6R " 21 " ( " c)	
" " " " " 7R " 19 " ( " a)	
" " " " " 8R " 32 " ( " b) und	
" " " " " 9R " 25 " ( " c).	

Diese Erhöhung schwankte also zwischen 14 und 32<sup>0</sup>/<sub>0</sub>. Nachdem der verwendete Beton a, b und c im Prüfungsalter von 5 Monaten Würfel Festigkeiten von 143, 277 und  $298 \text{ kg/cm}^2$  aufwies und die Querschnittsabmessungen der Balken gar nicht oder nur unerheblich voneinander abwichen, kommt in vorstehender Zusammenstellung der Einfluß der Betongüte auf diese Erhöhung recht gut zum Ausdruck.

<sup>1)</sup> Über eine gleichartige Beobachtung wird auch im Handb. f. Eisenbetonbau, 4. Aufl., I. Bd., S. 87 u. 88, berichtet.

Die erhebliche Überschreitung der Streckgrenze bei den Balken mit dem Beton a ist wohl darauf zurückzuführen, daß dieser Beton eine größere Bauwerksfestigkeit (im Mittel  $170 \text{ kg/cm}^2$ ) aufwies, als nach der Würfelfestigkeit zu erwarten stand. Im Gegensatz hierzu war die Bauwerksfestigkeit der Balken mit dem Beton b und c (im Mittel rd.  $190$  und  $220 \text{ kg/cm}^2$ ) geringer, als nach der Würfelfestigkeit zu erwarten stand. Es wäre somit der Einfluß der Betongüte auf die Verbundwirkung zweifellos noch ausgeprägter zum Ausdruck gekommen, wenn die verwendeten Betonsorten, entsprechend ihren Würfelfestigkeiten, auch größere Abweichungen in der Bauwerksfestigkeit gezeigt hätten (vgl. auch die Ausführungen des Verfassers in B. u. E. 1932, Heft 4, S. 67).

Voraussetzung für die Erzielung derartiger, hinsichtlich der Sicherheit günstiger Ergebnisse ist allerdings die, daß die Belastung der Balken bis zum vollständigen Bruch vorgenommen wird. Geschieht dies nicht, so können sich Ergebnisse ermitteln, die, wie z. B. bei den S. 87 angeführten Versuchen von Möller mit Platten aus Gabbro-beton ( $\sigma_{w20} = 174 \text{ kg/cm}^2$ ), im Widerspruch zu vorstehenden und sonstigen Versuchen stehen. Bei diesen Versuchen wurde nämlich die stahlbewehrte Platte III/5 im Gegensatz zur normalbewehrten Platte III/4 nicht bis zum vollständigen Bruch belastet, was sowohl aus dem Bruchbild dieser Platte zu entnehmen ist, wie aus der Beobachtung, daß diese Platte nach Abnahme der „Bruchlast“ um  $12 \text{ mm}$  wieder hochstieg. Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{ezul}}$  bestimmten Sicherheitsgrades ergab sich deshalb bei der Platte III/5 nur zu  $2\%$ , während sie bei der Platte III/4  $16\%$  betrug. Damit erklärt sich auch das S. 87 angeführte Ergebnis.

Voraussetzung für die Erzielung des oben angeführten, hinsichtlich der Sicherheit günstigen Ergebnisses ist weiter die, daß eine vorzeitige Zerstörung des Verbundes infolge Überwindung der Haftfestigkeit des Betons an den Eiseneinlagen nicht eintritt. Bei den Versuchen des Verfassers mit den Balken AA bis DD war dies auch nicht der Fall<sup>1)</sup>. Die bei den Balken EE beobachtete und auf diese Ursache zurückzuführende vorzeitige Zerstörung des Verbundes wäre zweifellos vermieden worden, wenn diese Balken statt mit 3 Rundeisen von  $14 \text{ mm}$  Durchm. z. B. mit 6 Rundeisen von  $10 \text{ mm}$  Durchm. bewehrt worden wären. Damit hätte sich die Oberfläche der Eiseneinlagen um  $43\%$  vergrößert und die Haftspannung entsprechend verringert<sup>2)</sup>.

Der an dem Balken AA bis DD beobachtete Bruchvorgang widerlegt also die von Skall gemachte Beobachtung einer vorzeitigen Zerstörung des Verbundes infolge Überwindung der Haftfestigkeit des Betons an den Stahleinlagen. Diese Beobachtung ist vielmehr zweifellos auf die geringe Güte des bei den Versuchen von Skall verwendeten Betons, der eine Würfelfestigkeit von nur  $\sigma_{w20} = 140 \text{ kg/cm}^2$  aufwies, zurückzuführen<sup>3)</sup>.

Da fast alle der bisher vorliegenden Versuche mit stahlbewehrten Balken unter Verwendung von Beton besonderer Güte durchgeführt wurden<sup>4)</sup>, demnach das günstige Verhalten dieser Balken hinsichtlich der Haftfestigkeit des Betons an den Stahleinlagen

<sup>1)</sup> Die vorgenannten Versuche des D. A. f. E. scheiden bei dieser Betrachtung aus, da bei denselben Baustahl mit Walzhaut verwendet wurde.

<sup>2)</sup> Vgl. auch die Versuche von Saliger, Abschnitt III, C b 3.

<sup>3)</sup> Die Versuche wurden bereits nach einer Erhärungszeit des Betons von 22 Stunden vorgenommen.

<sup>4)</sup> Es betrug z. B. bei den Versuchen von Geßner-Nowak (33)  $\sigma_{w20} = 417$  und  $455 \text{ kg/cm}^2$ , bei den Versuchen von Geßner (34)  $\sigma_{w20} = 403$  bis  $410 \text{ kg/cm}^2$ .

dem verwendeten Beton zuzuschreiben ist, dürfte es immerhin ein bemerkenswertes Ergebnis der in diesem Abschnitt behandelten Versuche des Verfassers sein, daß schon mit einer Würfel Festigkeit des verwendeten Betons von etwa  $250 \text{ kg/cm}^2$  bei stahlbewehrten Balken, unter der Voraussetzung einer guten Aufteilung des erforderlichen Eisenquerschnittes, eine Verbundwirkung erzielt werden kann, durch welche eine vorzeitige Überwindung der Haftfestigkeit des Betons an den Eiseneinlagen vermieden wird.

Voraussetzung für die Erzielung der weiter oben angeführten, für die Sicherheit günstigen Ergebnisse ist auch die, daß eine vorzeitige Zerstörung des Verbundes infolge Überwindung der Schubfestigkeit des Verbundes an den Balkenenden nicht eintritt. Trotz der in Tafel 18 angeführten teilweise hohen Werte für  $\tau_0$  wurde eine auf derartige Ursache zurückzuführende Zerstörung bei keinem der Balken festgestellt. Auch wurden keine Schubrisse beobachtet.

Die Veränderlichkeit des Sicherheitsgrades von Balken, die bei gleichbleibender zulässiger Betondruckspannung und zunehmender Eisenzugspannung bemessen werden, läßt sich an Hand eines Vergleiches der Versuchsergebnisse der für  $\sigma = 40/1200 \text{ kg/cm}^2$  bemessenen Balken B und BB und der für  $\sigma = 40/2000 \text{ kg/cm}^2$  bemessenen Balken A und AA verfolgen.

Wegen der verschieden hohen Streckgrenze der zu diesem Balken verwendeten Eiseneinlagen ist für die Vornahme eines solchen Vergleiches jedoch zunächst eine Umrechnung nötig, und zwar etwa derart, daß die Tragfähigkeit der Balken A und AA im umgekehrten Verhältnis der höheren Streckgrenze der Eiseneinlagen dieser Balken gegenüber jener der Balken B und BB verringert wird. Es leitet sich dann bei den Balken A und AA ein 2,1- und 2,8facher Sicherheitsgrad ab.

Bei gleichbleibender zulässiger Betondruckspannung von  $40 \text{ kg/cm}^2$  nahm demnach der Sicherheitsgrad der Balken B und A im Verhältnis 1:0,60, jener der Balken BB und AA im Verhältnis 1:0,62 ab.

Diese Abnahme fand also etwa im umgekehrten Verhältnis der in Rechnung gestellten zulässigen Eisenzugspannung statt.

Die Veränderlichkeit des Sicherheitsgrades von Balken, die bei gleichbleibender zulässiger Eisenzugspannung und zunehmender Betondruckspannung bemessen werden, läßt sich an Hand eines Vergleiches der Versuchsergebnisse der für  $\sigma = 40/2000 \text{ kg/cm}^2$  bemessenen Balken A und AA, der für  $\sigma = 100/2000 \text{ kg/cm}^2$  bemessenen Balken C und CC, und der für  $\sigma = 120/2000 \text{ kg/cm}^2$  bemessenen Balken D und DD verfolgen.

Wegen der verschieden hohen Streckgrenze der zu diesen Balken verwendeten Eiseneinlagen ist es für die Vornahme eines solchen Vergleiches wiederum nötig, die Tragfähigkeit der Balken A und AA sowie C und CC im umgekehrten Verhältnis der höheren Streckgrenze der Eiseneinlagen dieser Balken gegenüber jener der Balken D und DD zu verringern. Es leitet sich dann bei den Balken A und AA ein 2,0- und 2,8facher, bei den Balken C und CC ein 1,8- und 2,5facher Sicherheitsgrad ab.

Bei gleichbleibender zulässiger Eisenzugspannung  $\sigma_e = 2000 \text{ kg/cm}^2$  nahm demnach der Sicherheitsgrad der Balken A, C und D im Verhältnis 1:0,90:0,85, jener der Balken AA, CC und DD im Verhältnis 1:0,89:0,82 ab.

Diese Annahme fand etwa im umgekehrten Verhältnis der in Rechnung gestellten zulässigen Betondruckspannung statt, wie folgende Ableitung zeigt.

Wird nämlich für die umgerechnete Tragfähigkeit der Balken A und AA sowie C und CC die unter der Bruchlast vorhandene Betondruckspannung berechnet, so ermittelt sich

bei den Balken	A	$\sigma_b = 77 \text{ kg/cm}^2$	
" "	"	AA	$\sigma_b = 105$ "
" "	"	C	$\sigma_b = 175$ " und
" "	"	CC	$\sigma_b = 244$ " ,

während nach Tafel 18

bei den Balken	D	$\sigma_b = 201 \text{ kg/cm}^2$	und
" "	"	DD	$\sigma_b = 270$ "

beträgt.

Der in der Druckzone der Balken vorhandene Sicherheitsgrad ist damit

bei den Balken	A	ein 1,92facher,	
" "	"	AA	" 2,64 "
" "	"	C	" 1,75 "
" "	"	CC	" 2,44 "
" "	"	D	" 1,67 " und
" "	"	DD	" 2,25 "

Die Abnahme dieser Sicherheitszahlen steht also bei den Balken A, C und D im Verhältnis 1:0,91:0,87, bei den Balken AA, CC und DD im Verhältnis 1:0,93:0,85. Sie stimmt demnach recht gut mit der weiter oben angeführten Abnahme überein.

Als besonders bemerkenswertes Ergebnis der durchgeführten Versuche sei noch hervorgehoben, daß es bei Vornahme der Querschnittsbemessung von biegebeanspruchten Platten und Balken mit den erhöhten zulässigen Beanspruchungen  $\sigma = 100/2000 \text{ kg/cm}^2$  schon bei einer Würfel Festigkeit des verwendeten Betons von etwa  $250 \text{ kg/cm}^2$  und einer Streckgrenze der Stahleinlagen von etwa  $4000 \text{ kg/cm}^2$  möglich ist, eine etwa 2,5fache Bruchsicherheit zu erzielen.

Für die Beurteilung dieser Sicherheit wird darauf verwiesen, daß ein wesentlich höherer Sicherheitsgrad auch bei einer Querschnittsbemessung mit normalen Beanspruchungen nicht zu erwarten ist, nachdem bei einer zulässigen Eisenzugspannung von  $1200 \text{ kg/cm}^2$  die Streckgrenze von handelsüblichem Rundeisen schon  $2400 \text{ kg/cm}^2$  betragen kann und bei einer zulässigen Betondruckspannung von  $40 \text{ kg/cm}^2$  der Nachweis einer Würfel Festigkeit des verwendeten Betons von  $120 \text{ kg/cm}^2$  genügt (D. B. § 29, 1).

Auf die Rissesicherheit von hochbeanspruchten Platten und Balken wird S. 100 eingegangen.

γ) Versuche mit stahlbewehrten Balken aus höchstwertigem Beton.

Um ein Bild auch darüber zu gewinnen, in welcher Größenordnung sich die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{ezul}}$  bestimmten Sicherheitsgrades bei Verwendung von höchstwertigem Beton ergibt, wurden gleichzeitig mit den Balken CC (vgl. S. 88) zwei stahlbewehrte Balken CC', die sich von den erstgenannten Balken nur durch die Verwendung eines Betons besonderer Güte unterscheiden, hergestellt. Die Herstellung dieses Betons erfolgte mit dem hochwertigen Zement C (vgl. S. 88) bei einem Mischungsverhältnis von  $420 \text{ kg Z/m}^3$ .

Tafel 19. Vergleich zwischen rechnerischem Sicherheitsgrad und tatsächlichem Sicherheitsgrad von stahlbewehrten Balken aus höchstwertigem Beton.  $n = 15$ . Spannweite  $l = 1,0$  und  $1,2$  m.

Balken	$\sigma_{e_{20}}$ kg/cm <sup>2</sup>	$\mu$ %	$\sigma_s$ kg/cm <sup>2</sup>	Gebrauchslast		Mittlere Rißlast $P'$ kg	$\sigma_{b_2}$ kg/cm <sup>2</sup>	Riss-sicherheit		Bruchlast				Sicherheitsgrad		$\Delta$ %	Bruchursache
				$P$ kg	$\sigma_b/\sigma_e$ kg/cm <sup>2</sup>			$P'$	$P$	$P_{t_{max}}$ Einzel- werte	$P_{t_{max}}$ Mittel- wert	$\sigma_b/\sigma_e$ kg/cm <sup>2</sup>	$\tau_0$ kg/cm <sup>2</sup>	$\tau_1$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_s$ $\sigma_{e_{zul}}$		
CC'	396	1,07	4160	2350	100/2000	2300	63,7	0,98	6000 6400	262/5240	17,4	19,6	2,1	2,6	24	Überschreiten der Streckgrenze der Eisemeinlagen u. anschließende Zerstörung des Betons in der Druckzone.	
	407	1,10	4080	420	100/2000	~	~	~ 1,0	1155 <sup>1)</sup> 1092 <sup>1)</sup>	270/5400	9,5	11,5	2,0	2,7	35		Überschreiten der Streckgrenze der Eisemeinlagen u. anschließende Zerstörung des Betons in der Druckzone.

a) Versuche von Olsen:

b) Versuche von Gessner:

<sup>1)</sup> Diese Bruchlasten sind Mittelwerte aus jeweils 3 Einzelversuchen.

Die Würfel Festigkeit des Betons betrug nach 45tägiger Erhärtungszeit 396 kg/cm<sup>2</sup>, die Biegezugfestigkeit 54,8 kg/cm<sup>2</sup>.

Tafel 19 enthält die Versuchsergebnisse.

Die Bruchursache der Balken CC' war die gleiche wie bei den Balken CC. Auch das Bruchbild der Balken CC' wich so unerheblich von jenem der Balken CC ab, daß von einer Wiedergabe desselben abgesehen werden kann.

Wie aus Tafel 19 hervorgeht, wurde bei den Balken CC' eine mittlere Bruchlast von 6200 kg ermittelt. Für die Zulassung von  $\sigma = 100/2000$  kg/cm<sup>2</sup> mit  $P = 2350$  kg ergibt sich demnach ein 2,6facher Sicherheitsgrad, während der durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmte Sicherheitsgrad ein 2,1facher war.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades betrug demnach bei den Balken CC' 24 %.

Diese Erhöhung war also um etwa 25 % größer wie bei den Balken CC.

Zum Vergleich sei noch ein von Gessner (34) durchgeführter Versuch an den stahlbewehrten Balken a angeführt. Diese Balken hatten einen Querschnitt von 12 auf 7 cm und wurden bei 120 cm Spannweite durch eine Einzellast in Feldmitte bis zum vollständigen Bruch belastet. Die Bewehrung bestand aus 2 Rundeisen von 7 mm Durchm.; die Streckgrenze derselben betrug 4080 kg/cm<sup>2</sup>. Die Bewehrungsstärke dieser Balken war mit 1,1 % dieselbe wie bei den Balken CC'.

Die an Würfeln von 20 cm Kantenlänge ermittelte Druckfestigkeit des verwendeten Betons ergab sich im Prüfungsalter der Balken von 14 Tagen im Mittel zu 407 kg/cm<sup>2</sup>.

Tafel 19 enthält die Versuchsergebnisse, wobei der Mittelwert aus 2 x 3, also aus 6 Einzelversuchen gebildet wurde.

Wie aus dieser Tafel hervorgeht, ermittelte sich für diese Balken eine mittlere Bruchlast von 1124 kg. Da  $\sigma = 100/2000$  kg/cm<sup>2</sup> mit  $P = 420$  kg vorhanden ist, so wiesen

diese Balken einen 2,7fachen Sicherheitsgrad auf, während der durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{zul}}}$  bestimmte Sicherheitsgrad ein 2,0facher war.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades betrug demnach bei den Balken a 35 %.

Es kann also der Sicherheitsgrad von stahlbewehrten Platten und Balken bei Verwendung von höchstwertigem Beton ganz beträchtlich über den durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrad gesteigert werden.

d) Versuche mit stahlbewehrten, unter Berücksichtigung von  $n=10$  bemessenen Balken aus hochwertigem Beton.

Es wurde bereits begründet, warum bei Verwendung von hoch- oder höchstwertigem Beton zutreffender mit  $n=10$  als mit  $n=15$  gerechnet wird. Auch wurde bereits darauf hingewiesen, daß bei gleichbleibender Gebrauchslast und gleichbleibenden zulässigen Beanspruchungen die Querschnittsbemessung mit  $n=10$  eine größere Querschnittshöhe und geringere Bewehrungsstärke ergibt als die Querschnittsbemessung mit  $n=15$ .

Wird z. B. der Querschnitt der Balken CC der Abb. 20 bei gleichbleibender Gebrauchslast  $P=2350$  kg und gleichbleibenden zulässigen Beanspruchungen  $\sigma=100/2000$  kg/cm<sup>2</sup> unter Berücksichtigung von  $n=10$  bemessen, so vergrößert sich die Nutzhöhe um 11,5 %, dagegen verringert sich der Querschnitt der Eiseneinlagen um 14,5 %. Abb. 22 zeigt den mit  $n=10$  bemessenen Querschnitt.

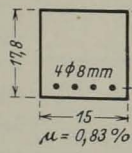


Abb. 22. Querschnitt des Balkens CC".

Es ergibt sich nun die wichtige Frage, inwieweit die Bruchicherheit der mit  $n=10$  bemessenen Balken von jener der mit  $n=15$  bemessenen Balken abweicht. Um diese Frage beantworten zu können, wurden gleichzeitig mit den Balken CC aus gleichem Beton zwei Balken CC" mit dem in Abb. 22 dargestellten Querschnitt hergestellt. Die Lagerung und Prüfung dieser Balken erfolgte wie bei den Balken CC.

Tafel 20 enthält die Versuchsergebnisse.

Die Bruchursache der Balken CC" war dieselbe wie bei den Balken CC. Auch wich das Bruchbild der Balken CC" nur unerheblich von jenem der Balken CC ab.

Tafel 20. Vergleich zwischen rechnermäßigem und tatsächlichem Sicherheitsgrad von stahlbewehrten Balken aus hochwertigem Beton.  $n=10$ . Spannweite  $l=1,0$  m.

Bal- ken	$\sigma_{w_0}$ kg/cm <sup>2</sup>	$\mu$ %	$\sigma_s$ kg/cm <sup>2</sup>	Gebrauchslast		Mittlere Rißlast $P'$ kg	$\sigma_{b_s}$ kg/cm <sup>2</sup>	Risse- sicher- heit $\frac{P'}{P}$	Bruchlast			Sicherheits- grad		Bruchursache			
				$P$ kg	$\sigma_b/\sigma_e$ kg/cm <sup>2</sup>				$P'_{\text{max}}$ Einzel- werte	$P'_{\text{max}}$ Mittel- wert	$\sigma_b/\sigma_e$ kg/cm <sup>2</sup>	$\tau_0$ kg/cm <sup>2</sup>	$\tau_1$ kg/cm <sup>2</sup>		$\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{zul}}}$	$\frac{P'_{\text{max}}}{P}$	$d$ %
CC"	264	1,07	4200	2350	100/2000	2200	57,8	0,93	6000 6200	6100	256/5120	14,1	15,3	2,1	2,6	24	Überschreiten der Streck- grenze der Eiseneinlagen und anschließende Zer- störung des Betons in der Druckzone.

Wie aus Tafel 20 hervorgeht, wurde bei den Balken CC'' eine Bruchlast von 6100 kg ermittelt. Für die Zulassung von  $\sigma = 100/2000 \text{ kg/cm}^2$  mit  $P = 2350 \text{ kg}$  ergibt sich demnach ein 2,6facher Sicherheitsgrad. Derselbe war also um 4% größer als jener der Balken CC.

Die infolge der zusammengesetzten Sicherheit bewirkte Erhöhung des durch das Verhältnis  $\frac{\sigma_s}{\sigma_{e\text{zul}}}$  bestimmten Sicherheitsgrades vergrößerte sich damit bei dem Balken CC'' auf 24%.

Dieses gegenüber den Balken CC hinsichtlich der Bruchsicherheit etwas günstigere Ergebnis der Balken CC'' läßt sich im Hinblick auf die vorgenommenen wenigen Versuche allerdings nicht verallgemeinern. Möglicherweise ist es auf die größere Querschnittshöhe der Balken CC'' zurückzuführen (vgl. die Ausführungen S. 82).

Auf jeden Fall lassen aber die Versuche erkennen, daß bei gleichbleibender Gebrauchslast und gleichbleibenden zulässigen Beanspruchungen der Sicherheitsgrad der unter Berücksichtigung von  $n = 10$  bemessenen Platten und Balken gegenüber jenen unter Berücksichtigung von  $n = 15$  bemessenen nicht wesentlich abweichen wird.

#### 4. Die Rissesicherheit.

Hochbeanspruchte Platten und Balken weisen im allgemeinen eine geringe Rissesicherheit auf. Inwieweit eine solche vorhanden ist, wird nachstehend untersucht.

Zunächst sei bemerkt, daß der Beton keine Risse aufweisen wird, solange die in der Zugzone unter der Gebrauchslast auftretende Dehnung die Dehnungsfähigkeit des Betons nicht überschreitet. Eine solche Überschreitung findet im allgemeinen nicht statt, wenn die Querschnittsabmessungen von Platten und Balken so gewählt werden, daß die nach der üblichen Berechnungsweise abgeleiteten Betonzugspannungen  $\sigma_{b_z}$  bestimmte Größtwerte nicht überschreiten.

Als übliche Berechnungsweise dient bekanntlich jene nach Zustand I, wobei die Eiseneinlagen vorwiegend mit  $n = 15$ , vielfach aber auch mit  $n = 10$  berücksichtigt werden.

Welche Werte für  $\sigma_{b_z}$  sich mittels der Berechnungsweise nach Zustand I mit  $n = 15$  ermitteln, wenn die Querschnitte einfach bewehrter Platten und Balken für bestimmte zulässige Beanspruchungen  $\sigma_b/\sigma_e$  nach Zustand II bemessen werden, ist für  $h = 0,9 d$  aus folgender Tafel 21 zu entnehmen<sup>1)</sup>.

Tafel 21.  
Größe der Betonzugspannungen  $\sigma_{b_z}$  in  $\text{kg/cm}^2$   
bei Platte und Balken.  
 $n = 15$ .  $h = 0,9 d$ .

$\sigma_b$ in $\text{kg/cm}^2$	40	60	80	100
$\sigma_e = 1200 \text{ kg/cm}^2$	24	38,7	50,4	61,0
$\sigma_e = 1500 \text{ "}$	22	37,7	51,5	63,8
$\sigma_e = 2000 \text{ "}$	19	34,7	50,0	64,5

Aus Tafel 21 geht zunächst die bereits früher<sup>2)</sup> behandelte Tatsache hervor, daß bei gleichbleibender geringerer Betondruckspannung und zunehmender Eisenzugspannung die Werte  $\sigma_{b_z}$  abnehmen, bei gleichbleibender größerer Betondruckspannung — etwa von  $\sigma_b = 80 \text{ kg/cm}^2$  an — und zunehmender Eisenzugspannung diese Werte jedoch zunehmen.

Diese Tatsache läßt sich auch an Hand von Versuchen nachweisen. So ergab sich nach Tafel 18 bei den mit  $\sigma = 40/1200 \text{ kg/cm}^2$  bemessenen Balken B

<sup>1)</sup> Die ausführliche Tafel mit einer zeichnerischen Darstellung findet sich in der früheren Abhandlung des Verfassers (26), S. 68 u. 69.

<sup>2)</sup> Vgl. Olsen (26), S. 67 ff.