

Die verschiedene Handhabung der Untersuchung ist darauf zurückzuführen, daß, während die Streckgrenze der Eiseneinlagen schon bei der Anlieferung auf jeden Fall in ihrer unteren Begrenzung bekannt ist, womit der durch die zulässige Eisenzugspannung als Teil der Streckgrenze bestimmte Sicherheitsgrad keinesfalls unterschritten wird, beim Beton erst durch besondere Ableitungen die erforderliche Würfelfestigkeit ermittelt werden muß, die keinesfalls den beabsichtigten Sicherheitsgrad unterschreitet. Eine bei der Bauausführung nachgewiesene größere Würfelfestigkeit würde dann diesen Sicherheitsgrad entsprechend erhöhen.

Die weitere Sicherheitsuntersuchung der Eisenbetonkonstruktionen, deren Zerstörung infolge zu großer Querkräfte in der Nähe der Auflager erfolgt, soll derart gehandhabt werden, daß ermittelt wird, inwieweit die erreichbare Schubfestigkeit des Verbundes von der Güte des Betons und von der Art der Schubsicherung abhängt.

Vor Vornahme der Untersuchung des Sicherheitsgrades der einzelnen Konstruktions- teile werden nachstehend zunächst die für diese Untersuchung in der Hauptsache maßgeblichen baustofflichen Bezugsgrößen, nämlich die Würfel- und Bauwerksfestigkeit sowie die Prismen- und Biegedruckfestigkeit des Betons, außerdem die Streckgrenze der Eiseneinlagen kurz besprochen<sup>1)</sup>. Da überdies die Kenntnis der Formänderungen des Betons sowie der Einfluß der wiederholten Belastungen für diese Untersuchung notwendig ist, wird anschließend auch auf diese Formänderungen bzw. auf diesen Einfluß kurz eingegangen.

### 3. Die für die Ermittlung des Sicherheitsgrades maßgeblichen wichtigsten baustofflichen Bezugsgrößen.

#### a) Die Würfelfestigkeit des Betons.

Im allgemeinen ist es üblich, die Druckfestigkeit des Betons an Versuchskörpern in Form von Würfeln nachzuweisen. Das Abdrücken dieser Würfel erfolgt bekanntlich nach vorhergehendem Abgleichen der abzudrückenden Flächen in Druckpressen zwischen ebenen und parallelen Platten genau mittig und stoßfrei.

Es ist klar, daß die derart ermittelte Druckfestigkeit nicht unmittelbar mit der Festigkeit des Betons im Bauwerk verglichen werden darf. Denn sowohl die Größe der Versuchskörper wie die Art ihrer Prüfung beeinflusst das Ergebnis. Auch kann dasselbe dadurch beeinflusst werden, daß bei reichlicher Wasserzugabe zum Beton das Wasser in den bei Herstellung der Probewürfel verwendeten, dicht schließenden eisernen Formen nicht abfließen kann<sup>2)</sup>.

Inwieweit die Größe der Versuchskörper das Ergebnis beeinflusst, geht aus nebenstehenden vom Ver-

	30-cm-Würfel	20 cm-Würfel	Erhöhung der Festigkeit
	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	%
Zement A . . .	256	288	13
Zement B . . .	316	342	8
Zement C . . .	412	456	11

<sup>1)</sup> Die Zug- und Schubfestigkeit des Betons wird in einem späteren Abschnitt besonders behandelt.

<sup>2)</sup> Der Einfluß der Stampfarbeit bei erdfeuchtem Beton auf das Ergebnis wird hier nicht weiter erwähnt, da ein solcher Beton für die Herstellung von Eisenbetonkonstruktionen gewöhnlich nicht in Betracht kommt.

Diesen Zahlen ist zu entnehmen, daß die Würfel mit 20 cm Kantenlänge im Mittel eine um etwa 10% größere Druckfestigkeit aufweisen als jene mit 30 cm Kantenlänge<sup>1)</sup>.

Dies ist zu beachten, wenn z. B. die Versuche des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton<sup>2)</sup> für irgendwelche praktische Zwecke ausgewertet werden, da bei diesen Versuchen die Druckfestigkeit des verwendeten Betons bisher fast durchweg an Würfeln von 30 cm Kantenlänge nach-

#### a) Einfluß der Druckrichtung.

	Druckrichtung		Abnahme der Festigkeit %
	senkrecht zur Einschüttrichtung kg/cm <sup>2</sup>	parallel zur Einschüttrichtung kg/cm <sup>2</sup>	
Zement A . . .	288	268	7
Zement B . . .	342	326	5
Zement C . . .	456	431	5

gewiesen wurde, während auf den Baustellen fast nur noch Würfel mit 20 cm Kantenlänge verwendet werden<sup>3)</sup>.

Inwieweit die Art der Prüfung das Ergebnis beeinflusst, geht aus nebenstehender Zusammenstellung hervor, in der die Abhängigkeit der Würfel-Festigkeit eines bestimmten Betons von der Wahl der Druckrichtung (senkrecht oder parallel zur Einschüttrichtung des Betons in die Würfel-Form) und der Geschwindigkeit der Laststeigerung gezeigt wird.

#### b) Einfluß der Geschwindigkeit der Laststeigerung.

	Laststeigerung je Sekunde		Zunahme der Festigkeit %
	etwa 2 kg/cm <sup>2</sup> kg/cm <sup>2</sup>	etwa 6 kg/cm <sup>2</sup> kg/cm <sup>2</sup>	
Zement A . . .	288	312	8
Zement B . . .	342	374	9
Zement C . . .	456	488	7

Die Wahl der Druckrichtung beeinflusst demnach das Ergebnis um rd. 6%, die Geschwindigkeit der Laststeigerung dagegen um rd. 8%.

Vorstehende Ausführungen lassen bereits erkennen, daß die Ermittlung der Druckfestigkeit des Betons aus der Würfelprobe einer bestimmten Festlegung bedarf, wenn sie als Bezugsgröße für die Ableitung des Sicherheitsgrades von hochbeanspruchten Eisenbetonkonstruktionen dienen soll. Für eine solche Festlegung kommen bekanntlich die in den D.B., Abschnitt D, enthaltenen Vorschriften in Betracht, die, besonders soweit sie sich auf die Größe der Versuchskörper aus Beton, wie er bei Eisenbetonbauten Verwendung findet (§ 4, 1), und auf die Vornahme der Druckprobe (§ 8) beziehen, unbedingt einzuhalten sind. Auch die Verwendung eiserner Würfel-Formen ist vorgeschrieben (§ 5, 1).

Vorstehende Ausführungen lassen weiter erkennen, daß die durch die Würfelprobe nach diesen Vorschriften ermittelte Druckfestigkeit des Betons zunächst eine künstliche Größe ist, deren Zusammenhang mit der Bauwerksfestigkeit erst nachzuweisen ist. Im folgenden Abschnitt wird dieser Zusammenhang behandelt.

Eine selbstverständliche Voraussetzung für die Verwendung der Würfelprobe als Bezugsgröße ist auf jeden Fall die, daß der jeweils zu prüfende Beton auch tatsächlich der auf der Baustelle angemachten und zur Verarbeitung kommenden Mischung entnommen ist, demnach die jeweiligen Festigkeitseigenschaften des in den verschiedenen

<sup>1)</sup> Eine ähnliche Zunahme der Druckfestigkeit des Betons wiesen auch Burchartz (Arm. Beton 1912, S. 291) und Graf (11), S. 2, nach.

<sup>2)</sup> Dieser Ausschuß wird weiterhin mit D. A. f. E. abgekürzt.

<sup>3)</sup> Die an Würfeln von 20 cm Kantenlänge nachgewiesene Druckfestigkeit des Betons wird weiterhin mit  $\sigma_{1020}$  bezeichnet. Bei anderer Kantenlänge der Würfel wird diese entsprechend vermerkt.

Bauwerksteilen vorhandenen Betons möglichst getreulich wiedergibt. Alle unvermeidlichen Schwankungen dieser Eigenschaften, welche z. B. durch den Mischvorgang, die Zuschlagstoffe, den Wassergehalt usw. bedingt sind, müssen bei der Würfelprobe unbedingt zum Ausdruck kommen.

Verfasser hat anlässlich der umfangreichen, etwa 240 000 m<sup>3</sup> betragenden Beton- und Eisenbetonarbeiten beim 2. Ausbau der Mittlere Isar AG., München, durch fortlaufende Proben festgestellt, in welcher Größenordnung solche Schwankungen auftreten können. Von einigen sog. „Ausreißern“ abgesehen, ergab sich nämlich, wenn der Mittelwert sämtlicher auf ein bestimmtes Mischungsverhältnis und auf Würfeln von 20 cm Kantenlänge bei jeweils annähernd gleichbleibender Steife bezogener Betondruckfestigkeiten sowie die zugehörigen Schwankungen der Grenzwerte zusammengestellt werden, folgendes Bild:

Mischungsverhältnis*)	Steife	Mittlere Druckfestigkeit kg/cm <sup>2</sup>	Schwankungen der Grenzwerte %
135 kg Zement je m <sup>3</sup> fertigen Beton	erdfeucht	170	± 44
160 „ „ „ „ „ „	„	213	± 34
200 „ „ „ „ „ „	„	238	± 38
260 „ „ „ „ „ „	weich	298	± 22
300 „ „ „ „ „ „	„	309	± 21
360 „ „ „ „ „ „	„	324	± 17
400 „ „ „ „ „ „	„	392	± 9

\*) Die für die möglichst genaue Einhaltung des jeweils vorgeschriebenen Mischungsverhältnisses erforderlichen Mengen an Bindemittel und Zuschlagsmaterial wurden durch besondere Vorversuche festgestellt (vgl. B. u. E. 1931, Heft 11).

Wie aus dieser Zusammenstellung hervorgeht, nahmen die Schwankungen der Grenzwerte mit zunehmendem Zementgehalt des Betons ab. Während dieselben bei einem Mischungsverhältnis von 135 kg Z/m<sup>3</sup> ± 44 % betragen, erreichten sie bei einem Mischungsverhältnis von 400 kg Z/m<sup>3</sup> nur noch ± 9 %. Dies ist in der Hauptsache darauf zurückzuführen, daß der Beton bei fetteren Mischungsverhältnissen eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Veränderlichkeiten in der Zementzugabe, in der Kornzusammensetzung des Zuschlagsmaterials sowie in der Wasserzugabe aufweist als bei mageren Mischungsverhältnissen.

Wie aus der vorstehenden Zusammenstellung weiter hervorgeht, sind die Schwankungen der Grenzwerte bei den für hochbeanspruchte Eisenkonstruktionen vorwiegend in Betracht kommenden Mischungsverhältnissen von 270 kg Z/m<sup>3</sup> bis 360 kg Z/m<sup>3</sup> immer noch recht erheblich, weshalb nicht eindringlich genug davor gewarnt werden kann, durch die vielfach angewandte besondere Sorgfalt bei der Herstellung der Probewürfel dazu beizutragen, daß ein falsches Bild über die tatsächliche Güte des Betons im Bauwerk und damit über den Sicherheitsgrad solcher Konstruktionen entsteht.

Die in der vorstehenden Zusammenstellung angeführten Würfelfestigkeiten, die nur den unter Verwendung von gewöhnlichem Portlandzement hergestellten Beton umfassen, lassen auch erkennen, daß die auf den Baustellen der Mittlere Isar AG. erzielten Betondruckfestigkeiten teilweise recht beträchtlich waren. Dies ist einestils

auf die heutige Güte dieser Zemente zurückzuführen, andernteils aber auch darauf, daß das für die Betonherstellung verwendete Zuschlagsmaterial durchweg gewaschen und aufbereitet wurde.

Bei Verwendung von hochwertigen Zementen wurden diese Würfelfestigkeiten noch wesentlich gesteigert. So ergaben sich bei einem Mischungsverhältnis von 400 kg Z/m<sup>3</sup> Würfelfestigkeiten von etwa 450 bis 500 kg/cm<sup>2</sup>.

Diese in der Hauptsache durch die heutige Zementveredlung mögliche Steigerung der Betondruckfestigkeiten ist bereits so beträchtlich, daß zur näheren Kennzeichnung derselben die Bezeichnung „höchstwertiger Beton“ angemessen erscheint<sup>1)</sup>.

Überhaupt empfiehlt es sich, zur näheren Kennzeichnung der durch die Würfelfestigkeit zum Ausdruck gebrachten Güte des Betons eine zahlenmäßige Abgrenzung der für die verschiedenen Festigkeitsstufen üblichen Bezeichnungen vorzunehmen.

In willkürlicher, aber zweckmäßiger Weise wird die folgende Abgrenzung vorgeschlagen, der Würfelfestigkeiten von 20 cm Kantenlänge und eine Erhärtungsdauer des Betons von etwa 4 bis 8 Wochen zugrunde liegen:

1. Geringwertiger Beton:  $\sigma_{w_{20}} < 120 \text{ kg/cm}^2$ ,
2. Gewöhnlicher        "     $\sigma_{w_{20}} = \text{rd. } 120 \text{ bis } 180 \text{ kg/cm}^2$ ,
3. Höherwertiger       "     $\sigma_{w_{20}} = \text{ " } 180 \text{ " } 250 \text{ " } ,$
4. Hochwertiger        "     $\sigma_{w_{20}} = \text{ " } 250 \text{ " } 400 \text{ " } ,$
5. Höchstwertiger     "     $\sigma_{w_{20}} > 400 \text{ kg/cm}^2$ .

Wie ersichtlich, lehnt sich der erste Teil der vorgeschlagenen Abgrenzung an die D. B. (§ 29) an, die Beton mit  $\sigma_{w_{20}} < 120 \text{ kg/cm}^2$  für Eisenbetonkonstruktionen nicht zulassen und für Eisenbetonkonstruktionen mit normalen Beanspruchungen, je nach deren Größe, den Nachweis einer Würfelfestigkeit von mindestens  $\sigma_{w_{20}} = 120$  bis etwa  $180 \text{ kg/cm}^2$  sowie für Eisenbetonkonstruktionen mit den vorgesehenen erhöhten zulässigen Beanspruchungen, ebenfalls je nach deren Größe, den Nachweis einer Würfelfestigkeit von mindestens  $\sigma_{w_{20}} = 180$  bis etwa  $250 \text{ kg/cm}^2$  verlangen. Für die Zulassung weitergehender Beanspruchungen, wie sie nachfolgend behandelt werden, kommt in der Hauptsache die Verwendung eines hochwertigen Betons in Betracht, dessen Druckfestigkeit innerhalb der angeführten Grenzen schwankt, während der als „höchstwertig“ bezeichnete Beton zur Erhöhung des Sicherheitsgrades von hochbeanspruchten Eisenbetonkonstruktionen dient.

Da die Würfelfestigkeit des Betons gewöhnlich die einzige bekannte Bezugsgröße ist, auf die sich die Sicherheitsberechnung der Eisenbetonkonstruktionen aufbaut, soweit deren Zerstörung nicht durch Überschreiten der Streckgrenze der Eiseneinlagen oder infolge der Wirkung der Querkräfte eingeleitet wird, kommt ihr eine weitgehende praktische Bedeutung zu. Aus diesem Grunde ist der nachstehend behandelte Vergleich zwischen der Würfelfestigkeit des Betons und seiner Bauwerksfestigkeit einerseits und zwischen der Würfelfestigkeit des Betons und seiner Prismen- bzw. Biegedruckfestigkeit andererseits als Grundlage der weiteren Ermittlungen von besonderer Wichtigkeit.

<sup>1)</sup> In diesem Zusammenhang wird darauf verwiesen, daß es sogar schon gelungen ist, Hochofenschlackenbeton mit Würfelfestigkeiten von  $1100 \text{ kg/cm}^2$  nach 56 Tagen zu erzielen (vgl. D. Bauztg. 1930, Beilage S. 57). Auch ist es bereits gelungen, mit hochwertigem Zement unter Verwendung von Granitsplitt bzw. Grauwackensplitt Würfelfestigkeiten von 980 und  $1080 \text{ kg/cm}^2$  nach 65 Tagen zu erzielen (vgl. Bauing. 1931, Heft 40).

β) Vergleich zwischen der Würfel Festigkeit des Betons  
und seiner Bauwerksfestigkeit.

Es erscheint zunächst nicht ohne weiteres möglich, von der Würfel Festigkeit des Betons auf seine Bauwerksfestigkeit zu schließen, weil im Bauwerk der Spannungszustand der reinen Würfel Festigkeit fast niemals vorkommt. Außerdem erhärten die Versuchswürfel unter ganz anders gearteten Bedingungen als der Beton im Bauwerk. Auch kann der in den dicht schließenden eisernen Formen enthaltene Wasserzusatz, falls dieser reichlich ist, die Würfel Festigkeit des Betons gegenüber seiner Bauwerksfestigkeit erheblich verringern, nachdem auf der Baustelle bekanntlich ein Teil des Wassergehaltes schon vor dem Einbringen des Betons in die einzelnen Bauteile verloren geht und überdies in der Schalung durch das ansaugende Holz entzogen wird.

Zur Klarstellung des Zusammenhanges zwischen der Würfel Festigkeit des Betons und seiner Bauwerksfestigkeit wurden bereits mehrfach Versuche durchgeführt. Bekannt sind u. a. die Versuche von Berndt und Preuß<sup>1)</sup>, von Graf<sup>2)</sup>, von Burchartz<sup>3)</sup> sowie die an der Barberiner und Wäggitaler Staumauer<sup>4)</sup> und an der Bremer Kajemauer<sup>5)</sup> vorgenommenen Versuche.

Zusammengefaßt ist diesen Versuchen zu entnehmen, daß die an den vorschriftsmäßig unter Verwendung von eisernen Formen hergestellten Probewürfel ermittelte Druckfestigkeit des Betons im allgemeinen die Bauwerksfestigkeit recht gut wiedergibt. Soweit Abweichungen bestehen, ist, besonders hinsichtlich der bei Eisenbetonbauten üblichen weichen und flüssigen Mischungen, die Bauwerksfestigkeit eher größer als die Würfel Festigkeit.

γ) Vergleich zwischen der Würfel Festigkeit des Betons  
und seiner Prismenfestigkeit.

Da nach Bach die Druckfestigkeit eines prismatischen Betonkörpers mit zunehmender Höhe im Verhältnis zur Würfel Festigkeit nicht unerheblich abnimmt, ergibt sich die Notwendigkeit der Festlegung einer Übertragungsziffer

$$\alpha = \frac{\text{Prismenfestigkeit}}{\text{Würfel Festigkeit}} \text{ des Betons.}$$

Eine derartige Festlegung ist um so notwendiger, als die im Schrifttum fast ausschließlich angeführte Übertragungsziffer  $\alpha = 0,8$  für genügend schlanke Säulen<sup>6)</sup> — etwa vom Schlankheitsverhältnis  $\frac{l}{d} = 4$  ab ( $l =$  Höhe des Prismas,  $d =$  kleinste Querschnittseite) — die gewöhnlich vorliegenden Verhältnisse schon deshalb nicht wiedergibt, weil sie unter Verwendung von Würfeln mit 32 cm Kantenlänge abgeleitet wurde<sup>7)</sup>, während heute zum Nachweis der Druckfestigkeit des für Eisenbetonkonstruktionen verarbeiteten Betons fast durchweg Würfel mit 20 cm Kantenlänge verwendet werden, die nach S. 8 eine um etwa 10% größere Druckfestigkeit aufweisen als die Würfel mit 30 cm Kantenlänge. Schon aus diesem Grunde verringert sich die Übertragungsziffer auf etwa  $\alpha = 0,72$ .

<sup>1)</sup> D.A.f.E., Heft 36. — <sup>2)</sup> D.A.f.E., Heft E. — <sup>3)</sup> Zement 1927, Heft 34. — <sup>4)</sup> E. Stadelmann, Gußbeton, Zürich 1925. — <sup>5)</sup> Agatz, Die rationelle Bewirtschaftung des Betons, Berlin 1927.

<sup>6)</sup> Erst in neuester Zeit wurde wieder ausgeführt, daß „es bezüglich der Säule als ausgemacht gilt, daß die Säulenfestigkeit etwa 80% der Würfel Festigkeit beträgt“ (vgl. Zement 1930, S. 1209).

<sup>7)</sup> Vgl. D. Bauztg. 1914, Beilage Nr. 5.

Diese Übertragungsziffer kann sich aber noch weiter verringern, wenn die baumäßige Ausführung der Säulen berücksichtigt wird. Dies ist hauptsächlich auf das durch das vielfach übliche Einschütten des Betons in die undurchbrochene Schalung hoher Säulen sowie auf das durch das Vorhandensein der Bewehrungsseisen begünstigte Entmischen des Betons zurückzuführen. So finden sich im Schrifttum Werte bis zu  $\alpha = 0,49$ <sup>1)</sup>.

Wird einer Entmischung des Betons dadurch vorgebeugt, daß z. B. die Schalung ein bewegliches Feld erhält, das ein nachträgliches Mischen des Betons durch Stochern und durch Klopfen an der Schalung von unten aus ermöglicht, so ist je nach der beim nachträglichen Mischen aufgewandten Sorgfalt allerdings keine oder nur eine unwesentliche Verringerung der oben abgeleiteten Übertragungsziffer zu erwarten.

Im Hinblick auf die Anwendung derartiger, eine wesentliche Verringerung der Übertragungsziffer auf jeden Fall verhindernden Vorkehrungen beim Einbringen des Betons in die Schalung soll dieselbe in den weiteren Ausführungen

bei Verwendung von 30-cm-Würfeln mit  $\alpha = \frac{3}{4}$  und  
 bei Verwendung von 20-cm-Würfeln mit  $\alpha = \frac{2}{3}$

berücksichtigt werden.

Diese Werte stimmen, wie noch eingehend gezeigt wird, recht gut mit den sich aus Versuchen ergebenden Übertragungsziffern überein.

#### d) Vergleich zwischen der Würfelfestigkeit des Betons und seiner Biegedruckfestigkeit.

Die Druckfestigkeit des Betons wird vielfach statt an Würfeln an stark bewehrten Eisenbetonbalken ermittelt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß diese Art der Festigkeitsermittlung auf der Baustelle in einfacher Weise ohne maschinelle Hilfsmittel möglich ist. Bei weichem und nassem Beton bietet sie überdies den Vorteil, daß ein nachträgliches Absaugen des überschüssigen Wassers durch die Holzschalung erfolgen kann.

Zur Klarstellung des Zusammenhanges zwischen der Würfelfestigkeit des Betons und seiner Biegedruckfestigkeit wurden die nachstehend beschriebenen Versuche an

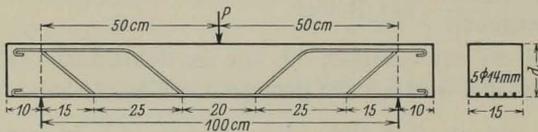


Abb. 1. Versuchsbalken zur Ermittlung der Biegedruckfestigkeit des Betons.

Balken, wie sie in Abb. 1 dargestellt sind, durchgeführt.

Diese Balken erhielten bei 1,2 m Länge und 15 cm Breite eine aus 5 Rundeisen von 14 mm Durchm. bestehende Bewehrung, die direkt auf die Bodenschalung gelegt wurde.

Um zu zeigen, daß die Biegedruckfestigkeit des Betons ebenso wie seine Würfelfestigkeit keine feststehende Größe darstellt, sondern unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen von der Wahl der Querschnittsabmessungen des Versuchskörpers abhängig ist, wurde die Querschnittshöhe der Balken veränderlich gewählt, und zwar betrug

bei der 1. Versuchsreihe  $d = 8$  cm,  
 bei der 2. Versuchsreihe  $d = 12$  cm und  
 bei der 3. Versuchsreihe  $d = 16$  cm.

Sämtliche für die Versuche notwendigen Balken wurden gleichzeitig in Holzformen hergestellt, wobei zweierlei Mischungsverhältnisse des Betons, nämlich  $150 \text{ kg Z/m}^3$

<sup>1)</sup> Vgl. z. B. Handb. f. Eisenbetonbau, 3. Aufl., I. Bd., S. 383. Berlin 1921, Wilh. Ernst & Sohn.

und 300 kg Z/m<sup>3</sup>, zur Verwendung gelangten. Das Mischen des Betons erfolgte von Hand. Seine Steife war durchweg plastisch und ergab nach zehnmalem Aufstoßen des Grafschen Rütteltisches einen Betonkuchen von rd. 50 cm Durchm.<sup>1)</sup> Gleichzeitig mit den Balken wurden Probewürfel von 20 cm Kantenlänge hergestellt.

Die Balken wurden im Alter von 45 Tagen geprüft, indem sie bei 1 m Spannweite durch eine allmähliche Steigerung der Einzellast in Feldmitte bis zum Bruch, der durchweg infolge Überwindung der Druckfestigkeit des Betons eintrat, belastet wurden. Dabei wurde die maßgebende Bruchlast als Mittelwert aus jeweils zwei gleichlaufenden Versuchen gebildet. Gleichzeitig erfolgte auch das Abdrücken der Würfel, die für den Beton mit 150 kg Z/m<sup>3</sup> eine Druckfestigkeit von 148 kg/cm<sup>2</sup> und für den Beton mit 300 kg Z/m<sup>3</sup> eine solche von 236 kg/cm<sup>2</sup> aufwiesen. Tafel 1 enthält die Versuchsergebnisse.

Bezeichnet die Übertragungszahl  $\beta$  das Verhältnis

$$\beta = \frac{\text{Biegedruckfestigkeit}}{\text{Würfelfestigkeit}} \text{ des Betons,}$$

so ergibt sich aus dieser Tafel, daß bei den Balken aus gewöhnlichem Beton  $\beta = 1,56$  bis 1,23 und bei den Balken aus höherwertigem Beton  $\beta = 1,38$  bis 1,09 betrug. Dabei gehören die geringeren Werte zu den Balken mit der größeren Querschnittshöhe, und zwar beträgt die Annahme dieser Werte, z. B. bei einer Verdoppelung der Querschnittshöhe, rd. 20%.

Tafel 1. Zusammenstellung der Versuchsergebnisse.  
n = 15.

2000  
rd. 20%  
1. 8. 14!

Versuchsreihe	d cm	F <sub>e</sub> cm <sup>2</sup>	$\sigma_{w_{20}} = 148 \text{ kg/cm}^2$				$\sigma_{w_{20}} = 236 \text{ kg/cm}^2$			
			Bruchlast		Zugehörige Biegedruckfestigkeit $\sigma_b$ kg/cm <sup>2</sup>	$\frac{\sigma_b}{\sigma_{w_{20}}}$	Bruchlast		Zugehörige Biegedruckfestigkeit $\sigma_b$ kg/cm <sup>2</sup>	$\frac{\sigma_b}{\sigma_{w_{20}}}$
			Einzelwerte kg	Mittelwert kg			Einzelwerte kg	Mittelwert kg		
1	8	7,7	2000	2050	231	1,56	2900	2900	325	1,38
			2100				2900			
2	12	7,7	4000	4150	210	1,42	5800	6000	304	1,29
			4300				6200			
3	16	7,7	6250	6300	182	1,23	8850	8900	257	1,09
			6350				8950			

Die angeführten Werte für  $\beta$  weichen teilweise recht erheblich von der heute vielfach angewandten Übertragungsziffer  $\beta = 1,7$  ab, die als Mittelwert bei den Versuchen des D. A. f. E.<sup>2)</sup> an Balken von 8 bis 10 cm Querschnittshöhe ermittelt wurde. Diese Abweichung ist allerdings in erster Linie darauf zurückzuführen, daß der Ableitung dieser Übertragungsziffer durchweg Betondruckfestigkeiten zugrunde liegen, die an Würfeln von 30 cm Kantenlänge ermittelt wurden. Werden dieselben auf Würfel von 20 cm Kantenlänge umgerechnet, so ergibt sich  $\beta = \text{rd. } 1,5$ , welcher Wert z. B. mit der bei den Balken aus gewöhnlichem Beton als Mittelwert der 1. und 2. Versuchsreihe ermittelten Übertragungsziffer recht gut übereinstimmt (vgl. Tafel 1). Dagegen ergab sich die Übertragungs-

<sup>1)</sup> Von der Setzprobe wurde abgesehen, nachdem sich dieselbe als unzuverlässig erwiesen hat (vgl. die Ausführungen des Verfassers in B. u. E. 1929, Heft 20, S. 371).

<sup>2)</sup> Vgl. D. A. f. E., Heft 19 u. 50. In ersterem Heft wurde überdies festgestellt, daß die Auflagerentfernung keinen ausgeprägten Einfluß auf die Größe der Übertragungsziffer ausübt.

ziffer bei den Balken aus höherwertigem Beton erheblich geringer, was bekanntlich in der Hauptsache darauf zurückzuführen ist, daß ein solcher Beton geringere Stauchungen und eine weniger gekrümmte Verteilung derselben über den Druckgurt aufweist als gewöhnlicher Beton.

Aus diesem Grunde sollte in Übereinstimmung mit obigen Versuchen für höher- und hochwertigem Beton keine größere Übertragungsziffer als  $\beta = \frac{4}{3}$  zur Anwendung kommen.

Die Zulässigkeit dieser Übertragungsziffer erscheint deshalb berechtigt, weil dieselbe unter ungünstigeren Verhältnissen ermittelt wurde, als sie im allgemeinen praktisch auftreten. Ungünstiger sowohl insofern, als bei ihrer Ermittlung lediglich eine Einzelast verwendet wurde — diese gibt bekanntlich eine größere Übertragungsziffer, als wenn z. B. mehrere Einzellasten oder gleichmäßig verteilte Lasten verwendet werden<sup>1)</sup> —, aber auch insofern, als die Querschnittshöhe der Balken, mit welchen sie ermittelt wurde, recht gering war.

In guter Übereinstimmung mit diesem Ergebnis stehen die umfangreichen, in Heft 6 des österr. Eisenbetonausschusses (24) behandelten Balkenversuche, bei denen sich die Übertragungsziffer für höher- und hochwertigem Beton ( $\sigma_{w_{20}} = 227$  bis  $278 \text{ kg/cm}^2$ ) zu  $\beta = 1,2$  bis  $1,4$ , im Gesamtmittel zu  $\beta = 1,3$ , ergab.

Für höchstwertigem Beton ( $\sigma_{w_{20}} = \text{rd. } 400 \text{ kg/cm}^2$ ) verringerte sich bei diesen Versuchen die Übertragungsziffer bis auf  $\beta = \text{rd. } 1,0^2$ .

#### ε) Die Festigkeitseigenschaften der Bewehrungseisen.

Die allgemeinen Festigkeitseigenschaften der zur Bewehrung der Eisenbetonkonstruktionen dienenden Eiseneinlagen sind durch viele Versuche klargestellt und deshalb als bekannt anzusehen. Zur Sicherung bestimmter Festigkeitseigenschaften ist überdies vorgeschrieben, daß diese den Mindestforderungen genügen müssen, die für Eisenkonstruktionen durch besondere Normen festgelegt sind (D. B. § 7, 4). Diese Mindestforderungen sind z. B. in den Normalbedingungen für die Lieferung von Stahlbauwerken (Din 1000) niedergelegt.

Gegenwärtig kommen als Bewehrungseisen in der Hauptsache St 37 (Handelseisen) und St 52 (hochwertiger Baustahl) in Betracht. Dabei wird von ersterem Eisen eine Zugfestigkeit von mindestens  $3700 \text{ kg/cm}^2$ , von letzterem Eisen bei einem Durchmesser der Rundstäbe von 7 bis 18 mm eine solche von mindestens  $5200 \text{ kg/cm}^2$  verlangt.

Wichtiger als die Kenntnis der unteren Begrenzung der Zugfestigkeit ist die Kenntnis der unteren Begrenzung der Streckgrenze dieser Eisen. Diese beträgt für St 37  $2400 \text{ kg/cm}^2$  und für St 52  $3600 \text{ kg/cm}^2$ .

Gewöhnlich wird dieselbe je nach Walzung, Bearbeitung und Durchmesser der Rundstäbe mehr oder weniger überschritten, und zwar bei St 37 bis zu  $3000 \text{ kg/cm}^2$ , bei St 52 bis zu  $4500 \text{ kg/cm}^2$  und sogar darüber. Der hochwertige Baustahl St 52 weist demnach die gleichen Festigkeitseigenschaften auf wie der St Si. Er unterscheidet sich von diesem nur durch eine andere chemische Zusammensetzung<sup>3)</sup>, die gewählt wurde,

<sup>1)</sup> Vgl. D. A. f. E., Heft 19, S. 10.

<sup>2)</sup> Nach Versuchen von Saliger (45) mit Balken aus höchstwertigem Beton von  $\sigma_{w_{20}} = 412, 476$  und  $538 \text{ kg/cm}^2$  ermitteltē sich sogar  $\beta = 0,93, 0,89$  und  $0,90$ .

<sup>3)</sup> Nach den vorläufigen Vorschriften der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft für die Lieferung von Baustahl St 52 ist den Lieferwerken die chemische Zusammensetzung dieses Stahles freigestellt. Lediglich der Kohlenstoffgehalt ist mit 0,2 bis 0,25 % begrenzt. Es liegen infolgedessen bereits verschiedene Sorten von St 52 vor, die sich in der Hauptsache durch verschiedene Mengenverhältnisse an Zusätzen von Mangan, Chrom, Kupfer usw. unterscheiden.

um die bei der Herstellung von St Si sich ergebenden Schwierigkeiten, z. B. in der Einhaltung des mit 1 % vorgeschriebenen Siliziumgehaltes<sup>1)</sup>, zu vermeiden.

Im Hinblick auf die beim St 52 erzielbaren hohen Festigkeitszahlen sowie auf die gegenwärtigen Bemühungen um die Weiterentwicklung der hochwertigen Baustähle dürfte die Lieferbarkeit von Bewehrungsseisen mit einer Streckgrenze von mindestens 4000 kg/cm<sup>2</sup> zweifellos schon jetzt möglich sein. Allerdings darf eine solche Steigerung der Mindeststreckgrenze keinesfalls durch die vielfach übliche Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes erzielt werden, da die sich dadurch ergebende Sprödigkeit des Stahls, die sich vor allem in einer mangelhaften Schweißbarkeit und Biegefähigkeit in kaltem Zustande nachteilig äußert, seine praktische Anwendbarkeit im Eisenbetonbau in Frage stellen würde<sup>2)</sup>.

Am geeignetsten für die Bewehrung von hochbeanspruchten Eisenbetonkonstruktionen sind nach den vorliegenden Erfahrungen Stahlsorten, bei denen das Verhältnis zwischen der Streckgrenze und der Zugfestigkeit nicht größer als etwa 0,7 ist, also Stahlsorten, die z. B. bei einer Streckgrenze von etwa 4000 kg/cm<sup>2</sup> eine Zugfestigkeit von etwa 6000 kg/cm<sup>2</sup> aufweisen. Solche Stahlsorten haben keinen zu großen Gehalt an Kohlenstoff und besitzen deshalb eine gute Schweißbarkeit und Biegefähigkeit.

Ein Nachteil der hochwertigen Baustähle ist allerdings darin zu sehen, daß ihr Verformungsmaß mit etwa  $E_e = 2\ 100\ 000$  kg/cm<sup>2</sup> gleich jenem des handelsüblichen Eisens ist.

Da die Haftfestigkeit des Betons an den Eiseneinlagen zum großen Teil von der Oberflächenbeschaffenheit derselben abhängt, ist ein weiterer Nachteil der hochwertigen Baustähle darin zu sehen, daß die aus denselben hergestellten Rundstäbe gewöhnlich eine glatte Oberfläche aufweisen, während die aus Handelseisen hergestellten Rundstäbe eine Walzhaut besitzen. Es wird deshalb an Hand von Versuchen zu untersuchen sein, ob und inwieweit eine derartig glatte Oberfläche zu einer vorzeitigen Zerstörung des Verbundes infolge Überwindung der Haftfestigkeit des Betons führen kann.

Zu bemerken ist noch, daß das Verhalten der Bewehrungsseisen bei Druckbeanspruchung hinsichtlich der Bruchfestigkeit und des Verformungsmaßes ebenso angenommen werden kann wie bei Zugbeanspruchung. Dabei tritt an Stelle der Streckgrenze die Quetschgrenze, die bekanntlich bei etwa der gleich hohen Spannung erreicht wird wie die Streckgrenze.

#### 4. Die Formänderungen des Betons und der Eiseneinlagen.

Einleitend wurde bereits ausgeführt, daß der Sicherheitsgrad von Eisenbetonkonstruktionen auf die Beanspruchung des die Zerstörung des Verbundes einleitenden Baustoffes unter der Bruchlast bzw. unter dem zugehörigen Moment zur Beanspruchung dieses Baustoffes unter der Gebrauchslast bzw. unter dem zugehörigen Moment bezogen werden kann. Dabei ist jedoch erforderlich, die letztere Beanspruchung rechnermäßig unter Annahme einer auf S. 2 näher festgelegten Kräfteverteilung zwischen Beton und Eisen zu ermitteln, die gegenüber der tatsächlichen Kräfteverteilung erheblich abweichen kann. Es können sich deshalb beträchtliche Abweichungen zwischen

<sup>1)</sup> Z. B. wurden an zahlreichen Baugliedern des aus St Si bestehenden Stromüberbaues über die Oder bei Oppeln Aufblätterungen beobachtet, die auf einen zu hohen Gehalt an Silizium im Stahl (1,5 %) zurückzuführen waren. Auch versagte dieser Stahl bei der Kaltbiegeprobe (vgl. Bautechn. 1929, S. 90 u. 91).

<sup>2)</sup> Aus diesem Grunde dürfte in den D.B. von einer weiteren Anwendung des hochgekohlten St 48 für Eisenbetonkonstruktionen abgesehen worden sein.