

um die bei der Herstellung von St Si sich ergebenden Schwierigkeiten, z. B. in der Einhaltung des mit 1 % vorgeschriebenen Siliziumgehaltes¹⁾, 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/cm² 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 würde²⁾.

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/cm² eine Zugfestigkeit von etwa 6000 kg/cm² 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/cm² 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

¹⁾ 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).

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

den rechnungsmäßig ermittelten und den tatsächlich vorhandenen Querschnittsbeanspruchungen ergeben.

Diesen Abweichungen wird im Schrifttum, besonders im Hinblick auf die Frage der Bruchsicherheit, verschiedentlich eine übertriebene Bedeutung beigelegt. Es wird deshalb unter Hinweis auf die früheren Ausführungen nochmals betont, daß sie keinesfalls die beabsichtigte Bruchsicherheit der in Betracht kommenden Eisenbetonkonstruktion beeinflussen.

Es lassen allerdings bestimmte, im Schrifttum seither entweder überhaupt nicht oder nicht genügend beachtete Gesichtspunkte die Kenntnis der unter der jeweiligen Gebrauchslast bzw. unter dem jeweiligen zugehörigen Moment vorhandenen Abweichungen zwischen den rechnungsmäßig ermittelten und den tatsächlich vorhandenen Betondruckspannungen erwünscht erscheinen. So ist z. B. für die einwandfreie Klarstellung der bei hochbeanspruchten sehr schlanken Säulen sich ergebenden Frage der Knicksicherheit oder der bei sehr schlanken umschnürten Säulen sich ergebenden weiteren Frage der Sicherheit gegenüber dem Auftreten von Rissen in der Betonumhüllung außerhalb der Querbewehrung die Kenntnis dieser Abweichungen unbedingt erforderlich. Aber auch die Frage, inwieweit mittels einer bestimmten Berechnungsweise der Eisenbetonkonstruktionen der unter der Gebrauchslast bzw. unter dem zugehörigen Moment tatsächlich vorhandene Spannungszustand erfaßt wird, läßt die Kenntnis dieser Abweichungen erwünscht erscheinen.

Die Ermittlung der bei Eisenbetonkonstruktionen tatsächlich vorhandenen Betondruckspannungen ist bekanntlich dadurch erschwert, daß der Beton keine Verhältnismäßigkeit zwischen Formänderungen und Spannungen aufweist. Nachdem mit jedem Spannungszustand zwangsläufig ein bestimmter Formänderungszustand verbunden ist, werden diese Betondruckspannungen deshalb nur dann in ihrer tatsächlichen Größe erfaßt, wenn bei ihrer Ermittlung von den als Stauchungen auftretenden jeweiligen Formänderungen des Betons ausgegangen wird.

Um die Beziehungen zwischen diesen Stauchungen und den zugehörigen tatsächlich vorhandenen Betondruckspannungen klarstellen zu können, ist es jedoch nötig, besondere Vorversuche durchzuführen. Diese werden gewöhnlich in Form von Druckversuchen an Prismen aus Beton gleicher Beschaffenheit wie bei der in Betracht kommenden Eisenbetonkonstruktion vorgenommen, indem durch Feinmessungen die Stauchungen des Betons und gleichzeitig die jeweils zugehörigen Druckbeanspruchungen unter Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Druckkraft über dem Querschnitt des Prismas festgestellt werden.

Wird davon abgesehen, die genannten Beziehungen durch solche Vorversuche klarzustellen, so lassen sich die zu bestimmten Stauchungen gehörigen, tatsächlich vorhandenen Betondruckspannungen auch dadurch ermitteln, daß die jeweilige Größe dieser Stauchungen in eines der für Beton abgeleiteten Formänderungsgesetze eingesetzt und dieses ausgewertet wird.

Am bekanntesten ist z. B. das von Bach-Schüle als Potenzgesetz abgeleitete Formänderungsgesetz. Bezeichnet ε die auf die Längeneinheit bezogene Stauchung des Betons, σ_{b_t} die zu dieser Stauchung zugehörige als tatsächlich vorhanden anzusprechende Betondruckspannung und E_b das Verformungsmaß des Betons, so lautet dieses Gesetz

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{b_t}^m}{E_b} \quad \text{oder} \quad \sigma_{b_t} = \sqrt[m]{\varepsilon \cdot E_b}.$$

Die Beiwerte m und E_b hängen von den jeweiligen Festigkeitseigenschaften des Betons ab und schwanken zwischen etwa $m = 1,16$ bis $1,10$ und $E_b = 200\,000$ bis $400\,000$ kg/cm², wobei die erstgenannten Werte für Beton geringerer Festigkeit gelten.

dimensionen falsch!

Wie Versuche zeigen, besteht jedoch für die Anwendung dieses Gesetzes die Einschränkung, daß es nur für Betondruckspannungen bis zu etwa 60 kg/cm² zutrifft¹⁾.

Aus diesem Grunde wurde verschiedentlich versucht, die Beziehungen zwischen den Stauchungen des Betons und den zugehörigen Betondruckspannungen durch andersartige Formänderungsgesetze besser zu erfassen. Dabei wurden mit den Beiwerten a und b z. B. hyperbolische und parabolische Spannungsgesetze von der Form

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{b_t}}{a - b \cdot \sigma_{b_t}} \quad \text{oder} \quad \sigma_{b_t} = \frac{a \cdot \varepsilon}{1 + b \cdot \varepsilon}$$

sowie

$$\sigma_{b_t} = a \cdot \varepsilon - b \cdot \varepsilon^2$$

abgeleitet. Z. B. fand Wohlers²⁾ für einen Beton mit einer Prismenfestigkeit von 173 kg/cm² die bis in die Nähe der Bruchlast zutreffende Gleichung

$$\sigma_{b_t} = 311\,000 \varepsilon \cdot (1 - 450 \varepsilon).$$

Der Anwendung der angeführten Formänderungsgesetze steht allerdings insofern eine Schwierigkeit entgegen, als seither — wohl im Hinblick auf die sich ergebende umfangreiche Rechenarbeit — eine Auswertung der erforderlichen Beiwerte in Abhängigkeit von der Festigkeit des Betons vollständig fehlt. Aus diesem Grunde ist z. B. die bereits verschiedentlich behandelte Aufgabe, die unter Zugrundelegung eines der genannten Formänderungsgesetze sich ergebenden teilweise recht verwickelten Beziehungen zwischen den tatsächlichen Querschnittsbeanspruchungen des Betons und der bei Säulen jeweils zugehörigen mittigen oder außermittigen Druckkraft bzw. dem bei Platten und Balken jeweils zugehörigen Moment in möglichst einfache Gleichungen zu kleiden, ohne jede praktische Bedeutung³⁾.

Bei Behandlung der Frage der Knicksicherheit der Säulen werden deshalb die für ein noch zu behandelndes Formänderungsgesetz erforderlichen Beiwerte unter Berücksichtigung der vorgenannten Abhängigkeit aus Versuchen abgeleitet werden, soweit dies aus den bisher bekannten Stauchungsmessungen möglich ist.

Da sich überdies die Festigkeitseigenschaften des Betons mit der Zeit erheblich ändern können, gilt ein derartiges Formänderungsgesetz naturgemäß nur für einen Beton von bestimmtem Alter. Auf seine Veränderlichkeit für den gleichen Beton, aber von höherem Alter, wird deshalb noch einzugehen sein.

Sowohl für die Ermittlung der bei Eisenbetonkonstruktionen tatsächlich vorhandenen Betondruckspannungen mittels der angeführten Vorversuche wie mittels der angeführten Formänderungsgesetze ist streng zwischen den gemessenen gesamten und federnden Stauchungen des Betons zu unterscheiden. Ein zutreffendes Bild über die Größe der jeweils auftretenden tatsächlichen Betondruckspannungen läßt sich auf jeden Fall nur aus den gemessenen federnden Stauchungen des Betons gewinnen, da nur

¹⁾ Dreves (5), S. 5, zieht auf Grund seiner Untersuchungen sogar die wohl zu weitgehende Folgerung, „daß das Bach-Schülesche Gesetz endgültig seine Rolle ausgespielt hat“.

²⁾ Arm. Beton 1918, S. 110.

³⁾ Auf diese Aufgabe wurde mit Hilfe des Potenzgesetzes wohl erstmalig von Mörsch eingegangen (vgl. Der Betoneisenbau, 1. Aufl. 1902, S. 81). Besonders eingehend wurde sie mit Hilfe eines gleichartigen Gesetzes von Petermann (Arm. Beton 1915, Heft 1) sowie mit Hilfe des parabolischen Spannungsgesetzes von Wohlers (Arm. Beton 1918, Heft 5) behandelt.

diese den Teil der gesamten Formänderungsarbeit auslösen, durch den das Zurückgehen in den spannungslosen Zustand bewirkt wird¹⁾.

Da weiter mit Rücksicht auf die für die Messung der Stauchungen notwendige Zeit und Kosten ein mehrfacher Lastwechsel auf den verschiedenen Belastungsstufen gewöhnlich nicht vorgenommen wird, ist zu beachten, daß die Stauchungen des Betons auf jeder Belastungsstufe mit jedem Lastwechsel so lange zunehmen, bis nach einer bestimmten Anzahl von Lastwechseln der Beharrungszustand eintritt, indem bei zwei aufeinanderfolgenden Lastwechseln sich die gesamten und federnden Stauchungen nicht mehr ändern.

Als Beispiel seien die von Bach durchgeführten und in Heft 227 der Forschungsarbeiten (23), S. 11, wiedergegebenen Stauchungsmessungen an einem gering bewehrten und auf mittigen Druck beanspruchten Betonprisma angeführt²⁾. Bei diesen Stauchungsmessungen trat der Beharrungszustand

auf der ersten Belastungsstufe mit $\sigma_{bt} = 14,7 \text{ kg/cm}^2$ nach 5maligem Lastwechsel, auf der zweiten Belastungsstufe mit $\sigma_{bt} = 29,3 \text{ kg/cm}^2$ nach 10maligem Lastwechsel, auf der vierten Belastungsstufe mit $\sigma_{bt} = 58,1 \text{ kg/cm}^2$ nach 23maligem Lastwechsel, auf der sechsten Belastungsstufe mit $\sigma_{bt} = 85,8 \text{ kg/cm}^2$ sogar erst nach 54maligem Lastwechsel ein. Dabei betrug der Anteil der federnden Stauchungen, bezogen auf die gesamten Stauchungen, im Beharrungszustand der ersten Belastungsstufe 94%, im Beharrungszustand der sechsten Belastungsstufe 84%.

Je größer demnach die Belastungsstufe ist, desto mehr Lastwechsel sind nötig um den Beharrungszustand herbeizuführen. Dabei verringert sich sowohl mit zunehmender Belastung wie mit zunehmender Zahl der Lastwechsel der Anteil der federnden Stauchungen, bezogen auf die gesamten Stauchungen.

Wie diese Messungen weiter zeigten, nahmen die federnden Stauchungen zwischen erstem Lastwechsel und Beharrungszustand, trotz der geringen Prismenfestigkeit des verwendeten Betons von 141 kg/cm^2 , nur wenig zu. Die Zunahme betrug auf der ersten Belastungsstufe 2%, auf der sechsten Belastungsstufe 6,5%. Sie ist so gering, daß sie, wie auf S. 32 an einem Beispiel gezeigt wird, das auf Grund der Stauchungen beim jeweils ersten Lastwechsel ermittelte Formänderungsgesetz kaum beeinträchtigt.

Es genügt also, das Formänderungsgesetz des in Betracht kommenden Betons aus den beim ersten Lastwechsel gemessenen federnden Stauchungen abzuleiten.

Neben der Kenntnis der bei Eisenbetonkonstruktionen tatsächlich vorhandenen Betondruckspannungen kann auch die Kenntnis der unter der jeweiligen Gebrauchslast bzw. unter dem jeweiligen zugehörigen Moment tatsächlich vorhandenen Eisenzug- bzw. Eisendruckspannungen erwünscht sein.

Bekanntlich weisen die Eiseneinlagen Verhältnismäßigkeit zwischen Formänderungen und Spannungen auf. Deshalb ist die Ermittlung der unter irgendwelchen Belastungen tatsächlich vorhandenen Eisenzugspannungen aus den gemessenen Längenänderungen der Eiseneinlagen ohne weiteres möglich. Da jedoch bei den meisten

¹⁾ Bach hat erstmalig in den 90er Jahren des vorigen Jahrhunderts der Bestimmung des S. 16 angeführten Formänderungsgesetzes sowie des Verformungsmaßes E_b die federnden Stauchungen des Betons zugrunde gelegt. Im übrigen weichen die gleichzeitig mittels der federnden und gesamten Stauchungen ermittelten Betondruckspannungen nur unerheblich voneinander ab (vgl. das Beispiel S. 27).

²⁾ Dieses Beispiel wurde gewählt, weil dem Verfasser gleichartig weitgehende Versuche an unbewehrten Betonprismen nicht bekannt sind.

der vorliegenden Versuche von der am Beton in der Nähe der Eiseneinlagen gemessenen Längenänderung auf die Dehnung der Zugeisen geschlossen wurde, sei darauf verwiesen, daß eine derartige Ermittlung der Dehnung zu groben Fehlern führen kann. Dies ist auf die bekannte Beobachtung zurückzuführen, daß mit zunehmender Belastung Verschiebungen der Eiseneinlagen im Beton eintreten können. Solche Fehler lassen sich aber dadurch vermeiden, daß zum Zwecke der Messung die Eiseneinlagen entweder bloßgelegt oder mit eisernen Zapfen, die aus dem Beton herausreichen, versehen werden. Dabei ist die jeweils gesamte Dehnung zu messen, nachdem bekannt ist, daß die Eiseneinlagen bei Beanspruchungen unterhalb der Streckgrenze nur federnde Formänderungen aufweisen, solange nicht durch zu raschen Lastwechsel die Formänderungen plötzlich herbeigeführt werden.

Vorstehende Ausführungen gelten sinngemäß auch für Eiseneinlagen, die auf Druck beansprucht sind.

5. Der Einfluß häufig wiederholter Belastungen auf den Sicherheitsgrad.

Die Zerstörung einer Eisenbetonkonstruktion kann nicht nur durch einmaliges Aufbringen einer langsam bis zur Bruchlast anwachsenden Belastung, sondern schon durch eine weit geringere Belastung herbeigeführt werden, wenn diese oft genug aufgebracht und wieder entfernt wird. Dabei ist die Anzahl der hierzu erforderlichen Wiederholungen um so geringer, je größer diese Belastung ist. Es gibt aber eine Grenze — die sog. Dauer- bzw. Ursprungsfestigkeit — unterhalb der selbst bei einer unendlichen Anzahl von Wiederholungen der Belastung keine Zerstörung mehr herbeigeführt wird.

Wie aus Versuchen von Ornum¹⁾, Graf²⁾ und Mehmel³⁾ hervorgeht, beträgt die Dauerfestigkeit des Betons etwa das 0,4- bis 0,6fache der Würfelfestigkeit. Bei den Eiseneinlagen beträgt dieselbe nach Versuchen von Graf²⁾ etwa das 0,8fache der Streckgrenze.

Dabei ist zu berücksichtigen, daß die bei den genannten Versuchen vorgenommenen Wiederholungen der jeweiligen Belastung übertrieben rasch erfolgten. So wurden bei den Versuchen von Ornum in der Minute 10, bei den Versuchen von Mehmel sogar 30 bis 90 Be- und Entlastungen vorgenommen. Außerdem erfolgten ohne Unterbrechung 1,3 bis 1,5 Millionen Wiederholungen der Belastung. Die Versuchskörper wurden also innerhalb eines nur etwa 1 bis 2 Wochen dauernden Zeitraumes Belastungen unterworfen, wie sie in Wirklichkeit erst im Laufe vieler Jahre eintreten können.

Nachdem somit, entsprechend den Ausführungen auf S. 6, sowohl die zulässigen Betondruckspannungen wie die zulässigen Eisenzugspannungen von hochbeanspruchten Eisenbetonkonstruktionen bedeutend kleiner sind als die Dauerfestigkeit dieser Baustoffe, ergibt sich die Folgerung, daß häufig wiederholte Gebrauchslasten die Bruchlast solcher Konstruktionen keineswegs beeinflußt.

Diese Folgerung wird durch die bisher vorliegenden Versuche mit Balken und Plattenbalken aus Eisenbeton, soweit diese unter Einhaltung bestimmter zulässiger Beanspruchungen häufig wiederholten Belastungen unterworfen wurden, bestätigt. So ergab sich z. B. bei den Balkenversuchen von Ornum und Berry (13), S. 189,

¹⁾ Proceedings 1906.

²⁾ Bautechn. 1926, S. 529.

³⁾ Mehmel, Untersuchungen über den Einfluß häufig wiederholter Druckbeanspruchungen auf Druckelastizität und Druckfestigkeit von Beton. Berlin 1926.