wird, wiederum ganz beträchtlich ab. Es wird deshalb vorgeschlagen, die vorgeschriebenen Knickzahlen wenigstens dahingehend abzuändern, daß sie von $\frac{l}{D} = 15$ mit $\omega = 1$ bis $\frac{l}{D} = 35$ mit $\omega = 2{,}5$ geradlinig zunehmen.

Mit einer derartigen Zunahme der Knickzahlen wird immer noch eine reichliche Sicherheit gegenüber der Gefahr des Ausknickens erzielt.

Dies läßt sich versuchsmäßig — allerdings nur an einem Beispiel — nachweisen, nachdem sich unter den von der französischen Kommission für Eisenbeton geprüften Säulen eine umschnürte Säule befand, die ausknickte [vgl. (7) S. 297 oder (13) S. 415]. Diese Säule hatte den S. 48 beschriebenen Querschnitt, 4 m Höhe, sowie eine Bewehrungsstärke von $\mu = 1{,}13\,\%$ und $\mu' = 1{,}35\,\%$. Mit $D = 18{,}4$ cm errechnet sich $\frac{l}{D} = 22$. Die Prismenfestigkeit des Betons betrug $\sigma_p = 243$ kg/cm². Die Knicklast ergab sich mit 101,5 t.

Rechnungsmäßig ermittelt sich für diese Säule mit $n = 12$, $m = 25$ und $\sigma_{b_{zul}} = 80$ kg/cm² sowie mit der vorgeschlagenen Knickzahl $\omega = 1{,}5$ (vgl. Abb. 8) eine zulässige Gebrauchslast von 21 t, also ein 4,8facher Sicherheitsgrad. Mit der tatsächlichen Knickzahl $\omega = 1{,}15$ ermittelt sich dagegen eine zulässige Gebrauchslast von 27 t, also ein 3,8facher Sicherheitsgrad[1]).

Wird mit der in den D. B. vorgeschriebenen Knickzahl $\omega = 2{,}1$ gerechnet, so ergibt sich eine zulässige Gebrauchslast von nur 15 t, also ein 6,8facher Sicherheitsgrad. Der beabsichtigte 3fache Sicherheitsgrad wird demnach ganz beträchtlich überschritten.

B. Der durch eine Druckkraft außermittig belastete Eisenbetonquerschnitt.

a) Säulen mit einfacher Bügelbewehrung.

1. Säulen ohne Knickgefahr.

α) Allgemeines.

Für die Ableitung des Sicherheitsgrades von hochbeanspruchten, durch eine Druckkraft außermittig belasteten Säulen mit einfacher Bügelbewehrung ist streng zwischen geringerer und größerer Außermittigkeit der Druckkraft zu unterscheiden. Im ersten Falle geht die Zerstörung des Verbundes von der Druckzone des Querschnittes aus, indem der Beton zerdrückt und die Quetschgrenze der in der Druckzone befindlichen Eiseneinlagen überschritten wird. Im letzten Falle dagegen geht bei geringerer Bewehrungsstärke die Zerstörung des Verbundes von der Zugzone des Querschnittes aus, indem die Streckgrenze der dort befindlichen Eiseneinlagen überschritten wird. Bei größerer Bewehrungsstärke kann der Beton in der Druckzone zerstört werden, bevor die Streckgrenze der Eiseneinlagen in der Zugzone erreicht wird.

Für die Ableitung der Tragfähigkeit der Säulen bei geringerer, noch näher zu begrenzender Außermittigkeit der Druckkraft kommt bekanntlich

[1]) Bei dieser Säule wurde also der beabsichtigte 3fache Sicherheitsgrad nicht unerheblich überschritten. Dies ist zweifellos darauf zurückzuführen, daß sich wegen Fehlens von kugelförmig gelagerten Druckplatten in der Prüfungsmaschine die Enden der Säulen während des Versuches nicht drehen konnten, was eine Verringerung der freien Knicklänge und damit eine Erhöhung des unter Berücksichtigung der vollen Säulenhöhe abgeleiteten Sicherheitsgrades zur Folge hat.

die den vollen Eisenbetonquerschnitt berücksichtigende Berechnungsweise nach Zustand I in Betracht. Bezeichnet F_i diesen Querschnitt und W_i dessen Widerstandsmoment, so ermittelt sich, wenn die auf die Mittelachse des Querschnittes bezogene Außermittigkeit der Druckkraft e beträgt, die zu erwartende Tragfähigkeit der Säulen aus der Beziehung

$$\sigma = \frac{P}{F_i} + \frac{P \cdot e}{W_i}$$

zu

$$P_{r_{\max}} = \sigma \cdot \frac{F_i \cdot W_i}{W_i + e \cdot F_i}. \tag{22a}$$

Für σ ist die Würfelfestigkeit des Betons einzusetzen. Dieselbe ergibt sich aus folgender Überlegung.

Wird nämlich Gl. 22a umgeformt in

$$P_{r_{\max}} = \sigma \cdot \frac{F_i}{1 + e \cdot \frac{F_i}{W_i}} \tag{22b}$$

oder mit der Kernweite k des Eisenbetonquerschnitts in

$$P_{r_{\max}} = \sigma \cdot \frac{F_i}{1 + \frac{e}{k}}, \tag{22c}$$

so entspricht sie in ihrem Aufbau vollständig der sich aus Gl. 11 mit F_i ergebenden Gleichung für die Knicklast einer Säule

$$P_k = \sigma_w \cdot \frac{F_i}{1 + \frac{0,1}{a} \cdot \lambda^2}. \tag{11d}$$

Zwischen den Gl. 22 und 11d besteht außerdem insofern noch ein Zusammenhang, als sich das Ausknicken gedrückter Säulen stets auf einen außermittigen Kraftangriff zurückführen läßt, der entweder schon vom Beginne der Belastung an vorhanden ist oder erst mit zunehmender Belastung entsteht. Dabei ist dieser Kraftangriff an einem Hebelarm

$$e = \frac{0,1}{a} \cdot \frac{l^2}{x_d}$$

wirkend zu denken, wenn x_d den Abstand der Schwerachse vom kraftseitigen Querschnittsrand bezeichnet[1]). Dieser Hebelarm ist also neben x_d auch von der Säulenhöhe und der Güte des verwendeten Betons abhängig.

Es erscheint somit berechtigt, in den Gl. 22 für σ die Würfelfestigkeit des Betons einzusetzen. Eine weitere Frage ist allerdings die, ob $P_{r_{\max}}$ zutreffender mit der an Würfeln von 20 oder 30 cm Kantenlänge ermittelten Betondruckfestigkeit erfaßt wird.

Bei der Gl. 11 war diese Frage verhältnismäßig einfach zu beantworten, nachdem die an Würfeln von 20 oder 30 cm Kantenlänge ermittelten Werte σ_w und die jeweils zugehörigen Beiwerte a, besonders bei nicht zu großer Würfelfestigkeit, in einer derartigen Wechselbeziehung zueinander stehen, daß ein gewisser Ausgleich des Ergebnisses herbeigeführt wird. Dagegen fehlt bei den Gl. 22 eine derartige Wechselbeziehung.

Es muß deshalb an Hand der vorliegenden Versuchsergebnisse entschieden werden, welche Art Würfelfestigkeit zu berücksichtigen ist. Wie die späteren Ausführungen zeigen werden, wird $P_{r_{\max}}$ mit $\sigma_{w_{30}}$ zutreffender erfaßt wie mit $\sigma_{w_{20}}$.

1) Vgl. Föppl (9), S. 377 u. 378.

Es beträgt also bei Verwendung von Würfeln mit 30 cm Kantenlänge

$$P_{r_{\max}} = \sigma_{w_{30}} \cdot \frac{F_i}{1 + e \cdot \frac{F_i}{W_i}} \tag{23a}$$

und bei Verwendung von Würfeln mit 20 cm Kantenlänge

$$P_{r_{\max}} = 0{,}9 \cdot \sigma_{w_{20}} \cdot \frac{F_i}{1 + e \cdot \frac{F_i}{W_i}}. \tag{23b}$$

Dabei ist für die praktische Anwendung dieser Gleichungen, entsprechend den Ausführungen S. 5, die Würfelfestigkeit des Betons nach einer etwa 28tägigen Erhärtungszeit einzusetzen.

Für die Anwendbarkeit der Gl. 23 gilt hinsichtlich des bei Ableitung von F_i und W_i zu berücksichtigenden Verhältnisses n, des bei Verwendung von hochwertigem Baustahl einzuhaltenden Bügelabstandes sowie der Begrenzung der Bewehrungsstärke sinngemäß das bereits auf S. 20 ff. Gesagte.

Weiter ist für die Anwendbarkeit der Gl. 23 eine Begrenzung der Außermittigkeit e nötig. Die aus den D. B. (§ 27, 2) abzuleitende Begrenzung ergibt sich daraus, daß die aus den Beziehungen

$$\sigma_{b_d} = \frac{P}{F_i} + \frac{P \cdot e}{W_i} \tag{24a}$$

und

$$\sigma_{b_z} = \frac{P}{F_i} - \frac{P \cdot e}{W_i} \tag{24b}$$

errechneten Betondruck- und Betonzugspannungen das Verhältnis $\psi = \frac{\sigma_{b_d}}{\sigma_{b_z}} = -4$ nicht überschreiten dürfen. Da sich aus vorstehenden Beziehungen

$$e = \frac{\psi + 1}{\psi - 1} \cdot k \tag{25}$$

ableiten läßt, kann die für die Anwendbarkeit der Gl. 23 zugelassene Außermittigkeit e bei bekannter Kernweite des Eisenbetonquerschnitts ermittelt werden.

Für quadratische und rechteckige Eisenbetonquerschnitte mit beiderseits gleichgeteilter Bewehrung $F_e = F_e'$ [1]) und einem Randabstand der Eiseneinlagen von $a = 0{,}08\,d$ beträgt die Kernweite mit $\mu = \mu' = \frac{F_e}{b \cdot d}$

$$k = \frac{1 + 2{,}13 \cdot n \cdot \mu}{1 + n \cdot \mu} \cdot \frac{d}{6}. \tag{26}$$

Es ermittelt sich z. B. bei einer

Gesamtbewehrung von	1 %	3 %
mit $n = 15$	$k = 0{,}192\,d$	$0{,}225\,d$
mit $n = 10$	$k = 0{,}183\,d$	$0{,}209\,d$

und die für die Anwendbarkeit der Gl. 23 nach den D. B. sich ergebende Begrenzung der Außermittigkeit e beträgt bei einer

Gesamtbewehrung von	1 %	3 %
mit $n = 15$	$e = 0{,}320\,d$	$0{,}375\,d$
mit $n = 10$	$e = 0{,}305\,d$	$0{,}348\,d$.

[1]) Die nachstehenden Ausführungen werden auf Eisenbetonsäulen mit beiderseits gleichgeteilter Bewehrung beschränkt, nachdem diese Art der Bewehrung wohl am häufigsten zur Anwendung kommt.

Dieselbe schwankt also je nach Bewehrungsstärke zwischen etwa 0,3 bis 0,4 d.

Für die Ableitung der Tragfähigkeit der Säulen bei größerer Außermittigkeit der Druckkraft kommt bekanntlich die die Betonzugzone des Eisenbetonquerschnitts nicht berücksichtigende Berechnungsweise nach Zustand II in Betracht. Bezeichnet x den Abstand der Nullinie des Querschnitts vom gedrückten Rand sowie $F_e = F_e'$ den Querschnitt der beiderseits gleichgeteilten Bewehrung und wird bei geringerer Bewehrungsstärke unter der Bruchlast die Streckgrenze σ_s der Eiseneinlagen in der Zugzone erreicht, bevor der Widerstand des Betons in der Druckzone erschöpft ist, so ermittelt sich mit der statischen Querschnittshöhe h die zu erwartende Tragfähigkeit der Säulen aus den Beziehungen [vgl. z. B. Mörsch (25), S. 391]

(27a) $$P = \sigma_b \cdot \left[\frac{b \cdot x}{2} + n \cdot F_e \cdot \left(2 - \frac{d}{x}\right)\right]$$ und

(27b) $$\sigma_b = \frac{\sigma_e}{n} \cdot \frac{x}{h - x}$$ zu

(28a) $$P_{r_{\max}} = \frac{\sigma_s}{n} \cdot \frac{x}{h - x} \cdot \left[\frac{b \cdot x}{2} + n \cdot F_e \cdot \left(2 - \frac{d}{x}\right)\right].$$

Wird dagegen bei größerer Bewehrungsstärke unter der Bruchlast der Beton in der Druckzone zerstört, bevor die Streckgrenze der Eiseneinlagen in der Zugzone erreicht ist, so ermittelt sich die zu erwartende Tragfähigkeit der Säulen, wenn unter Hinweis auf die Ausführungen S. 14 bei Verwendung von hoch- oder höchstwertigem Beton als unterer Grenzfall die Biegedruckfestigkeit des Betons seiner an Würfeln von 20 cm Kantenlänge ermittelten Druckfestigkeit gleichgesetzt wird, nach Gl. 27a zu

(28b) $$P_{r_{\max}} = \sigma_{w_{20}} \cdot \left[\frac{b \cdot x}{2} + n \cdot F_e \cdot \left(2 - \frac{d}{x}\right)\right].$$

Für die Anwendbarkeit der Gl. 28 ist zu beachten, daß der für die Ableitung von x aus der bekannten kubischen Gleichung zu berücksichtigende Wert n nach anderen Gesichtspunkten zu ermitteln ist als bei den mittig oder mit geringerer Außermittigkeit auf Druck beanspruchten Säulen. Zweckmäßig wird bei Verwendung von gewöhnlichem oder höherwertigem Beton $n = 15$, bei Verwendung von hoch- oder höchstwertigem Beton $n = 10$ gesetzt. Dies wird bei Behandlung der auf Biegung beanspruchten Eisenbetonkonstruktionen noch näher begründet.

Zwischen der meistens gegebenen Gebrauchslast P und der unter dieser Last vorhandenen Querschnittsbeanspruchung $\sigma_{b_{d_{\text{zul}}}}$ besteht für die Berechnungsweise nach Zustand I die Beziehung

(29) $$P = \sigma_{b_{d_{\text{zul}}}} \cdot \frac{F_i}{1 + e \cdot \frac{F_i}{W_i}}.$$

Für die Berechnungsweise nach Zustand II ermittelt sich dagegen $\sigma_{b_{\text{zul}}}$ aus Gl. 27a.

Die kraftseitige Querschnittsbeanspruchung σ_{e_d}' der Eiseneinlagen unter der Gebrauchslast beträgt für die Berechnungsweise nach Zustand I

(30) $$\sigma_{e_d}' = n \cdot \sigma_{b_{d_{\text{zul}}}} \cdot \frac{x_d - a}{x_d},$$

während sich für die Berechnungsweise nach Zustand II

(31a) $$\sigma_e' = n \cdot \sigma_{b_{\text{zul}}} \cdot \frac{x - a}{x}$$

und die Eisenzugspannung aus Gl. 27b zu

$$\sigma_e = \frac{n \cdot \sigma_{b_{\mathrm{zul}}}}{x} \cdot (h - x) \tag{31b}$$

ergibt.

β) Der rechnungsmäßige Sicherheitsgrad.

Der aus dem Verhältnis der Bruch- zur Gebrauchslast abzuleitende Sicherheitsgrad vereinfacht sich bei geringerer Außermittigkeit der Druckkraft aus den Gl. 23 u. 29 zu

$$\nu_r = \frac{\sigma_{w_{30}}}{\sigma_{b_{d_{\mathrm{zul}}}}} \tag{32a}$$

oder zu

$$\nu_r = 0{,}9 \cdot \frac{\sigma_{w_{20}}}{\sigma_{b_{d_{\mathrm{zul}}}}}. \tag{32b}$$

Bei größerer Außermittigkeit der Druckkraft ergibt sich aus den Gl. 28b u. 27a, wenn $\sigma_b = \sigma_{b_{\mathrm{zul}}}$ gesetzt wird,

$$\nu_r = \frac{\sigma_{w_{20}}}{\sigma_{b_{\mathrm{zul}}}} \tag{33a}$$

bzw. aus den Gl. 28a u. 27b, wenn $\sigma_e = \sigma_{e_{\mathrm{zul}}}$ gesetzt wird,

$$\nu_r = \frac{\sigma_s}{\sigma_{e_{\mathrm{zul}}}}. \tag{33b}$$

γ) Der tatsächliche Sicherheitsgrad.

Die vorliegenden Versuche an außermittig belasteten Säulen mit einfacher Bügelbewehrung sind nicht zahlreich und beschränken sich fast durchweg auf eine geringe Außermittigkeit der Druckkraft. Teilweise sind sie auch nicht einwandfrei durchgeführt.

Versuche mit geringerer und größerer Außermittigkeit der Druckkraft wurden bisher lediglich von Bach und Graf (23), Heft 166 bis 169, an Säulen durchgeführt, die bei quadratischem Querschnitt von 40 cm Seitenlänge und 2,5 m Höhe u. a. beiderseits mit 4 Rundeisen von 16 mm oder mit 4 Rundeisen von 22 mm Durchm. bewehrt waren. Die Bewehrungsstärke betrug also $\mu = \mu' = 0{,}5$ bzw. 1 %. Angaben über die Quetschgrenze der Längseisen sowie über die Querbewehrung der Säulen wurden bereits S. 21 gemacht. Die Streckgrenze der Längseisen betrug 3773 bzw. 3672 kg/cm². Der bei den Versuchen verwendete Beton wies, wie ebenfalls bereits erwähnt wurde, eine an Würfeln von 30 cm Kantenlänge ermittelte Druckfestigkeit von 225 kg/cm² (also von $\sigma_{w_{20}} = \sim 250$ kg/cm²) auf, war also hochwertig. Die gewählten Außermittigkeiten der Druckkraft betrugen 10, 20 und 50 cm und waren auf die Mittelachse des Querschnitts bezogen. Die Versuchskörper wurden in einem Alter von 45 Tagen geprüft.

Die besondere Eignung dieser Versuche für die Ableitung des Sicherheitsgrades außermittig belasteter Säulen ist darauf zurückzuführen, daß bei denselben alle für eine einwandfreie Auswertung notwendigen Ermittlungen vorgenommen wurden. Auch wurden alle störenden Nebenerscheinungen wie Formänderungen durch die Querkraft oder Gleiten der Eiseneinlagen infolge Überwindung der Haftfestigkeit des Betons mittels zweckmäßiger Anordnungen ausgeschaltet.

Zunächst soll untersucht werden, inwieweit mit der die Berechnungsweise nach Zustand I berücksichtigenden Gl. 23a die tatsächlichen Bruchlasten erfaßt werden.