



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000300969

87

Fachverk:

- 10. Heft: Resultate der Untersuchung von armiertem Beton auf reine Zugfestigkeit und auf Biegung, unter Berücksichtigung der Vorgänge beim Entlasten; 1906, 18 Bogen, 7 Lichtdrucktafeln und 70 Textfiguren
- 11. Heft: Resultate der technologischen Untersuchung der schweizerischen Tone; 1907, 35 Bogen, mit 12 Textfiguren, 4 graphischen Darstellungen und 2 Farbentafeln
- 12. Heft: Resultate der Untersuchung von Eisenbetonbalken, und Ergebnisse der Prüfung von Portlandementen und hydraul. Kalken, 1917, 11 Bogen mit 24 Textfiguren und 4 Lichtdrucktafeln

13. Guss. Aufsätze für die Öffentl. Kommission des verminierten Landes. — Untersuchung des Einflusses der Druckspannungen im Eisenbetonbalken u. im Dreieck bei Drucklasten. — Dünngewandverschiebungen von Mörstel u. Beton beim Zerspringen.



Handwritten signature or initials at the bottom of the page.

MITTEILUNGEN
DER EIDGEN. MATERIALPRÜFUNGSANSTALT
AM SCHWEIZ. POLYTECHNIKUM IN ZÜRICH.

13. Heft.

VERSUCHE FÜR DIE SCHWEIZ. KOMMISSION DES ARMIERTEN BETON.

Untersuchung des Einflusses
der Druckspannungen in Eisenbetonbalken
und der Breite bei Druckplatten.

Längenänderungen von Mörtel und Beton
beim Erhärten.

Bearbeitet von

F. SCHÜLE,

Ingenieur, Professor am schweiz. Polytechnikum,
Direktor der eidg. Materialprüfungsanstalt.

Mit 25 Figuren und 3 Tafeln.

F. Nr. 21035



Selbstverlag der Anstalt.
In Kommission bei E. Speidel, Zürich IV.

ZÜRICH,
Buchdruckerei Aschmann & Scheller,
1909.

516

MITTEILUNGEN
DER EIDGEN. MATERIALPRÜFUNGSANSTALT
AM SCHWEIZ. POLYTECHNIKUM IN ZÜRICH.

13. Heft.

VERSUCHE FÜR DIE SCHWEIZ. KOMMISSION DES ARMIERTEN BETON.

Untersuchung des Einflusses
der Druckspannungen in Eisenbetonbalken
und der Breite bei Druckplatten.

Längenänderungen von Mörtel und Beton
beim Erhärten.

Bearbeitet von

F. SCHÜLE,

Ingenieur, Professor am schweiz. Polytechnikum,
Direktor der eidg. Materialprüfungsanstalt.

Mit 25 Figuren und 3 Tafeln.

Selbstverlag der Anstalt.
In Kommission bei E. Speidel, Zürich IV.

ZÜRICH,
Buchdruckerei Aschmann & Scheller,
1909.

MITTELSTADT

DER KÖNIGLICHEN BATHNAPOLITISCHEN UNIVERSITÄT
IN KRAKAU

1911

VERSUCHE FÜR DIE POLNISCHE KOMMISSION DER ARMIRTEN BETON



080100 - VI

der Druckspannungen in Eisenbetonbalken
und der Breite bei Druckstellen.

Längenspannungen von Mauerwerk und Beton
beim Erhitzen

BPK 12-148/2018

Vorwort.

Das vorliegende Heft enthält eine Fortsetzung der auf Veranlassung der *schweiz. Kommission des armierten Beton* vorgenommenen Untersuchungen der eidg. Materialprüfungsanstalt als Grundlage für die Aufstellung von Vorschriften für die Anwendung dieser Bauweise.

Die Versuche mit Eisenbetonbalken rechteckigen Querschnittes, welche im ersten Abschnitt behandelt werden, bezwecken den Einfluss der Armierungsstärke bei verschiedener Qualität des Beton und besonders die Frage der Bedeutung der Druckspannungen im Beton auf die Sicherheit der Balken aufzuklären, indem in dieser Hinsicht die bisherigen Vorschriften sich nicht auf Versuche gründen.

Im zweiten Abschnitte sind Druckversuche mit Betonprismen behandelt, welche einen Beitrag liefern sollen zu der Lösung der Frage der wirksamen Hourdisbreite bei Balken mit plattenförmigem Druckgurt.

Die Längenänderungen von Mörtel und Beton bei trockener, feuchter oder nasser Lagerung sind von grossem Einfluss bei der Bildung von Haarrissen in Eisenbetonbauten; im dritten Abschnitt wurden die in den letzten Jahren vorgenommenen Versuche der eidg. Materialprüfungsanstalt zusammengestellt und besprochen.

Der vierte Abschnitt behandelt den Einfluss der Lagerung bei verschieden stark armierten Balken namentlich in Bezug auf den Verlauf der Dehnungen im Zuggurt und der Durchbiegungen in Balkenmitte bei der Belastungsprobe auf Biegung.

Sämtliche Versuche wurden unter Mitwirkung des Herrn Abteilungsvorstehers *Ed. Brunner* durchgeführt; die Herren Ingenieure *Ed. Lacroix* und *A. v. Wattenwyl* haben an der Bearbeitung eines Teils der Versuche mitgewirkt.

Zürich, März 1909.

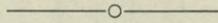
F. Schüle.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Der Einfluss der Armierung und der maximalen Druckspannungen auf den Sicherheitsgrad von Eisenbetonbalken:	
Einleitung. — Die Versuchskörper der I. Serie. — Die Durchführung. — Die Ergebnisse der Versuche. — Die berechneten Spannungen und der Sicherheitsgrad. — Schlussfolgerungen.	1
Untersuchung einer zweiten Balkenserie mit Beton geringerer Festigkeit. — Die Ergebnisse der Versuche. — Die berechneten Spannungen und der Sicherheitsgrad.	9
Die Durchbiegungen in Balkenmitte bei den einzelnen Belastungsstufen. — Die rechnerische Ermittlung der Durchbiegungen. — Die bleibenden Durchbiegungen.	12
II. Druckversuche mit Betonprismen:	
1. Einleitung. — 2. Einfluss der Länge bei vertikal eingestampften Prismen aus Mörtel. — 3. Einfluss der Länge bei liegend eingestampften Prismen aus Beton. —	17
4. Einfluss der Breite bei Betonprismen unter zentrischer Belastung auf einer Breite gleich der Prismadicke. —	19
5. Ergebnisse der Bruchbelastung. — 6. Versuche mit querarmierten Platten. — 7. Resultate der Messung von Längenänderungen. —	
8. Weitere Versuche über den Einfluss der Breite bei Betonplatten. — 9. Resultate der Messung von Längenänderungen. — 10. Zusammenfassung der Resultate. —	39
11. Anwendung auf die Ermittlung der wirksamen Breite der Druckgurtungen bei Balken mit mittlerer Rippe (Balken mit T-förmigem Querschnitt).	48
III. Resultate der Untersuchung der Längenänderungen beim Erhärten von Mörtel und Beton:	51
1. Einleitung. — 2. Längenänderungen von Mörtel aus verschiedenen Bindemitteln. — 3. Längenänderungen von Mörtel und Beton aus Portlandcement bei verschiedener Art der Lagerung. — 4. Einfluss der Schwindung des Beton auf die inneren Spannungen des bewehrten Beton.	
Tafeln.	
I. Längenänderungen von hydraul. Bindemitteln bei Luft- und Wasserlagerung.	60
II. Längenänderungen von Mörtel und Beton bei Lagerung an der Luft, unter Wasser und in feuchtem Sand. Portlandcement Z.	71
III. Längenänderungen von Mörtel und Beton bei Lagerung an der Luft, unter Wasser und in feuchtem Sand. Portlandcement V.	73
IV. Einfluss der Lagerung bei Balken mit verschiedener Armierungsstärke:	75
Anordnung der Versuche. — Qualität der Materialien. — Druck-Elastizitätsmessungen an Prismen. — Ergebnisse der Versuche. — Die berechneten Spannungen und der Sicherheitsgrad. — Die Dehnungsmessungen im Zuggurt. — Die Durchbiegungen und ihre Berechnung. — Die bleibenden Deformationen der Prismen und der Balken.	

Der Einfluss der Armierung und der maximalen Druckspannungen auf den Sicherheitsgrad von Eisenbetonbalken,

von Prof. F. Schüle in Zürich.



In dem 12. Heft der Mitteilungen der eidg. Materialprüfungsanstalt ist vom Verfasser auf Seite 64 und 65 hervorgehoben worden, dass eine strenge Einschränkung der Beton-Druckspannungen durch die Resultate der Belastungsproben von Balken bis zum Bruch nicht bedingt ist, und dass, durch Vorschreiben einer niedrigen Druckspannung des Beton, das Eisen nicht ökonomisch verwendet werden kann; die Sicherheit des Bauwerkes wird durch niedrige Druckspannungen in Balken nicht so erhöht, wie durch eine kräftigere Armierung und Zulassung höherer Spannungen im Druckgurt.

Die in Kraft stehenden Vorschriften setzen für Balken rechteckigen Querschnittes sehr enge Grenzen für die Armierungen voraus; wird der Eisenquerschnitt in Prozenten des Nutzquerschnittes des Beton (Breite mal Nutzhöhe d. h. mal Höhe zwischen Schwerpunkt der Eisenstangen und Druckgurtaussenkante) ausgedrückt, das Verhältnis der Elasticitätscoefficienten von Eisen und Beton mit n bezeichnet, so ist nach der Ritter'schen Methode die zulässige Druckspannung von 35 kg/cm² im Beton erreicht

	mit $n = 10$	$n = 20$	
und 1,0 t/cm ² Zugspannung im Eisen bei	1,02	0,85	% Armierung
1,2 " " " " " "	1,12	0,91	% " ;

nach der Methode, welche Risse im Zuggurt des Beton voraussetzt, ist die zulässige Druckspannung von 40 kg/cm² im Beton erreicht

	mit $n = 10$	$n = 20$	
und 1,0 t/cm ² Zugspannung im Eisen bei	0,58	0,45 ^{0,32}	% Armierung
1,2 " " " " " "	0,90 ^{0,42}	0,65	% " .

Für die meisten Fälle der Ausführung von Hourdisplatten im Hochbau reichen diese Grenzen der Armierung in der Praxis aus; für Brückenfahrbahnplatten, für Balken rechteckigen Querschnittes und für Rippen von T-Balken in der Nähe der Stützen sind hingegen die Fälle nicht selten, in welchen eine stärkere Armierung sich empfehlen würde; es ist dann üblich, die Festigkeit im Druckgurt durch Anbringung von Längsarmierungsseisen rechnerisch zu vergrössern, wenn auch dadurch der effektive Sicherheitsgrad kaum erhöht wird. Die meisten Versuche von Prüfungsanstalten halten sich an schwach armierte Balken; in Heft 45-47 der Mitteilungen über Forschungsarbeiten des Vereins deutscher Ingenieure behandelt z. B. Baudirektor v. Bach Versuche von 59 Balken rechteckigen Querschnittes, wovon 3 ohne Armierung, 34 mit 0,42 bis 0,64 % Armierung, 10 mit 0,93 bis 0,97 % Armierung und 12 mit 1,33 bis 1,35 % Armierung versehen waren. Die Versuche der eidg. Materialprüfungsanstalt betrafen Balken mit 1,17, 2,62, 3,5 und 4,8 % Armierung (siehe Heft 10 der Mitteilungen).

Die Schwierigkeiten bei der Anwendung stärkerer Armierungen rühren von der öfters ungenügenden Anordnung zur Aufnahme der Scheerkräfte her; nur unter den günstigsten Bedingungen wird die Streck-

grenze im Eisen erreicht; es tritt dann ein Oeffnen einzelner Risse in Balkenmitte ein und hierauf ein Zerdrücken des Beton im Druckgurt; bei ungeeigneter Führung der Armierungsstangen kommt vor dem Erreichen der Streckgrenze im Eisen eine Abscherung der Balkenenden vor. Die Zerdrückung des Druckgurttes durch Ueberschreitung der Druckfestigkeit des Beton, bevor die Streckgrenze im Eisen erreicht war, ist bisher bei Balken mit constantem rechteckigem Querschnitt unseres Wissens nicht gelungen.

Es sind im Juli 1908 an der eidg. Materialprüfungsanstalt in Zürich Versuche an 10 Balken von 3 Monaten Alter vorgenommen wurden, um den Einfluss der steigenden Armierung näher zu verfolgen. Zur Vermeidung vorzeitigen Bruches durch Scheerkräfte sind zwei der vier Armierungsseisen in den Endfeldern nacheinander aufgebogen worden und als Haken zur sicheren Verankerung der Eisen im Beton die von Herrn *Considère* empfohlenen Umbiegungen zur Anwendung gekommen. Abb. 1 gibt die Anordnung der Balken; die Armierungsseisen

	der Balken	Nr. 1	2	3	4	5
haben einen Durchmesser von		9	11	13	14	15 mm
erhalten, entsprechend		1,68	2,55	3,63	4,20	4,91 %

des Nutzquerschnittes des Beton.

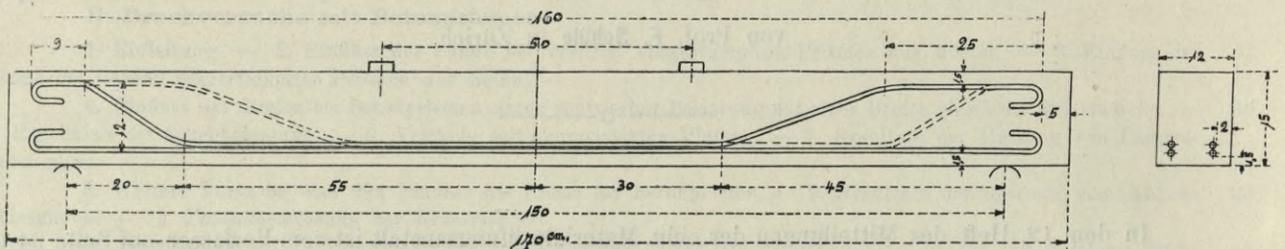


Abb. 1

Die Balken wurden erzeugt mit Beton aus 270 kg Portlandcement auf 1 m³ Kies und Sand; letztere Materialien, aus dem Zürichsee entnommen, waren im Verhältnis von 2 Kies : 1 Sand.

Versuche an Probekörpern, welche gleichzeitig wie die Balken erzeugt und daneben aufbewahrt wurden, ergaben die folgenden Druckfestigkeiten:

	Probekörper zu Balken	Nr. 1	2	3	4	5
1. Serie	<i>Druckfestigkeit</i>	337	263	278	254	266 kg/cm ²
2. Serie	<i>do.</i>	330	271	250	273	258 "

Als Eisen wurde Flusseisen verwendet, welches durch folgende Resultate der Zerreißproben gekennzeichnet ist:

	Durchmesser	9	11	13	14	15 mm
Streckgrenze		3,55	3,07	3,06	3,09	2,82 t/cm ²
Zugfestigkeit		4,56	3,94	4,08	4,23	3,76 t/cm ²
Contraction		68	72	67	70	63 %
Dehnung nach Bruch, auf den zehnfachen Durchmesser gemessen		29,6	29,1	30,6	31,5	29,6 %

Die Balken gelangten in zwei Serien zur Erprobung; die erste Serie von fünf Balken wurde durch Aussetzen an der Sonne in dem Monat vor dem Versuch möglichst getrocknet, die zweite Serie blieb im letzten Monate durch öfteres Bespritzen der Feuchtigkeit ausgesetzt. Einen merklichen Einfluss auf die Eigenschaften des Beton oder auf die Festigkeit der Balken hat sich durch diese verschiedene Behandlung nicht herausgestellt.

Die Balken wurden auf der Biegemaschine für verteilte Belastung bei 1,50 m Stützweite, der Einwirkung von zwei concentrirten Lasten *P* in 0,50 m Abstand symmetrisch zur Balkenmitte unterworfen.

Beobachtet wurden die Risse und die Durchbiegungen bei allen Balken; bei Balken Nr. 2¹ wurden ausserdem mittelst Spiegelapparaten die Längenänderungen an 6 Stellen im mittleren Felde (3 rechts und 3 links) zur Feststellung der Lage der Nulllinie und des einzuführenden Wertes *n* beobachtet. Auf die Durchbiegungen wird hier nicht näher eingetreten; zur Bestimmung der Lage der Nulllinie wurden nur die Längenänderungsmessungen im Druckgurt und in mittlerer Balkenhöhe benutzt; diejenigen in der Nähe der Eiseneinlagen geben bekanntlich nach Auftreten der ersten Risse unzuverlässige Resultate. In Abb. 2 sind

die den wachsenden Belastungen entsprechenden Lagen der neutralen Axe aufgetragen; zwei horizontale Linien für $n = 10$ und $n = 15$ sind ebenfalls eingezeichnet; nach Auftreten der Risse ist die neutrale Axe nahezu horizontal, der Wert $n = 10$ darf mit genügender Annäherung für die weiteren Berechnungen als den wirklichen Verhältnissen entsprechend zu Grunde gelegt werden.

Balken No. 2 Lage der Nulllinie.

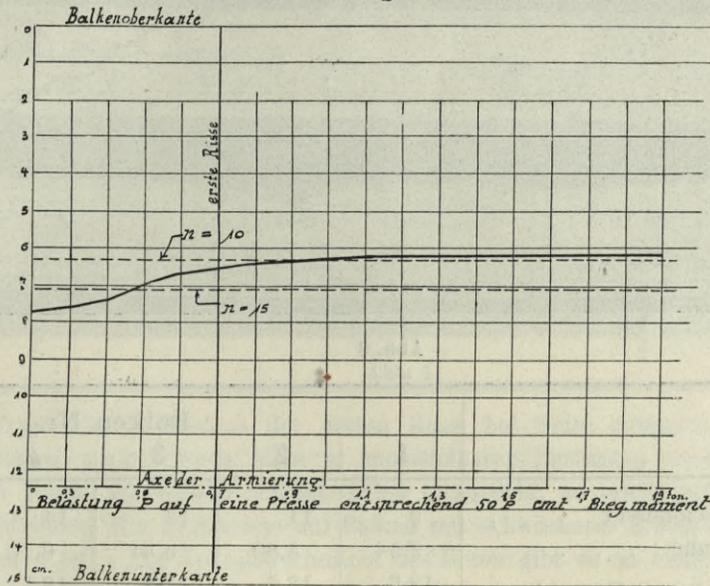


Abb. 2

Die Ergebnisse der Versuche sind in folgender Zusammenstellung enthalten, wobei die Balken mit derselben Armierung in beiden Serien durch einen Strich unterschieden sind, die Last P bezieht sich auf eine Presse.

Balken	Armierung in % des Nutzquerschn. des Beton	Nutzhöhe des Balkens	Last P beim Auftreten der ersten Risse	Last P b. Bruch (Scheerkraft)	Biegemoment beim Bruch in emt	Art des Bruches
		cm	t	t		
1	1,68	12,6	0,500	2,060	102	} Ueberschreitung der Streckgrenze, Erweiterung der Zugrisse und Zerdrücken des Druckgurtes.
1 ¹	1,68	12,6	0,700	2,100	104	
2	2,55	12,4	0,700	2,65	131	} Ueberschreitung der Streckgrenze, Erweiterung der Zugrisse und Zerdrücken des Druckgurtes.
2 ¹	2,55	12,4	0,700	2,48	123	
3	3,63	12,2	0,900	2,91	144	} Zerdrückung des Beton nahe des Kraftangriffes im Seitenfeld und darauffolgende Abscheerung.
3 ¹	3,63	12,2	0,900	3,10	154	
4	4,20	12,1	0,900	3,12	155	} Zerdrückung des Beton nahe des Kraftangriffes im Seitenfeld und darauffolgende Abscheerung.
4 ¹	4,20	12,1	0,900	3,20	159	
5	4,91	12,0	0,800	2,87	142	} Zerdrücken des Beton im Mittelfeld und nachfolgendes Oeffnen des Zugrisses.
5 ¹	4,91	12,0	1,200	3,14	156	

Die Balken mit derselben Armierung haben dieselbe Brucherscheinung gezeigt, und es haben diese Versuche die richtige Anordnung der Armierung zur Aufnahme der Scheerkräfte bestätigt. Die stark armierten Balken Nr. 3 bis 5 sind infolge Ueberschreitung der Druckspannung im Beton zu Grunde gegangen, eine Erscheinung, welche hierorts bisher nicht erzielt werden konnte. Die typischen Riss- und Brucherscheinungen sind in den photographischen Abbildungen Nr. 3 und 4 für die Balken Nr. 2, 4 und 5 der Serie 1, 2¹, 3¹ und 5¹ der Serie II mit Angabe der Belastung beim Auftreten der Risse wiedergegeben.

Zur Würdigung dieser Ergebnisse sollen die Spannungen im Eisen und im Beton-Druckgurt zum Vergleich herangezogen werden und zwar ermittelt unter der Voraussetzung des gerissenen Betonzuggurtes und unter der allerdings kurz vor dem Bruch nicht mehr zutreffenden Annahme, Eisen und Beton wirken elastisch und n sei gleich 10.

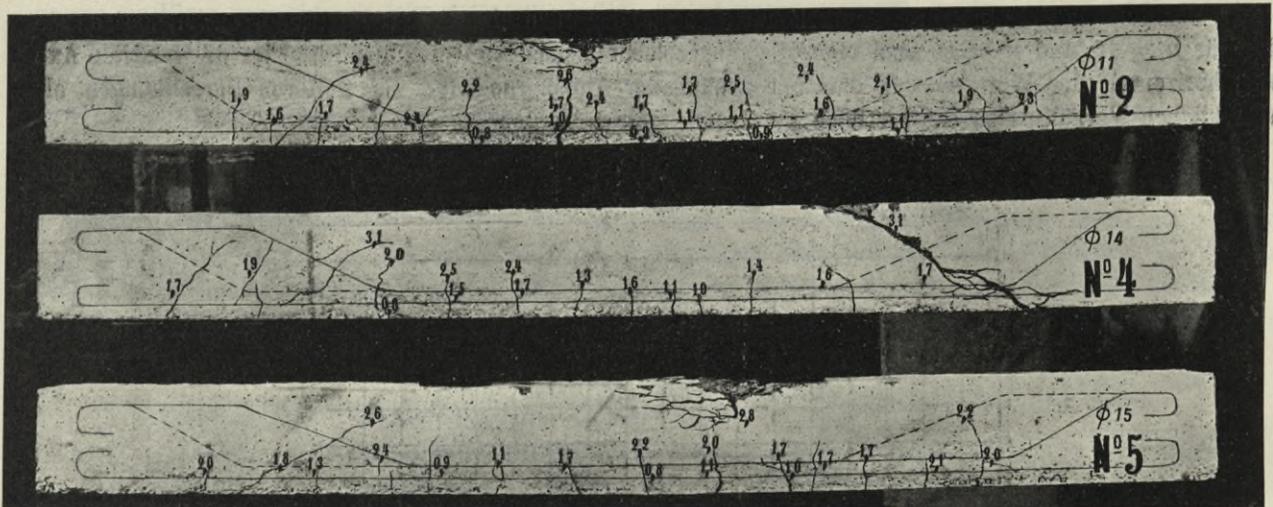


Abb. 3

	Balken Nr.				
	1	2	3	4	5
Armierung 4 Eisen Durchmesser	9	11	13	14	15 mm
Querschnitt der Armierung	2,54	3,80	5,31	6,10	7,07 cm ²
Nutzhöhe der Balken	12,6	12,4	12,2	12,1	12,0 cm
Abstand der Nulllinie von der Druckgurt- oberkante	5,50	6,26	6,89	7,12	7,36 cm
Abstand von Zug- und Druckzentrum	10,77	10,32	9,90	9,73	9,55 cm
Biegemoment beim Bruch (Mittel)	103	127	149	157	149 cmt
Kraft im Eisen	9,56	12,31	15,05	16,14	15,60 t
Spannung im Eisen	3,76	3,23	2,84	2,64	2,20 t/cm²
Druckspannung im Beton	291	330	370	376	348 kg/cm²
Streckgrenze des Eisens	3,55	3,07	3,06	3,09	2,82 t/cm ²
Würfel Festigkeit des Beton (Mittel)	333	267	264	264	262 kg/cm ²
Verhältnis: $\frac{\text{Spannung im Eisen}}{\text{Streckgrenze des Eisens}}$	1,06	1,05	0,93	0,85	0,78
Verhältnis: $\frac{\text{Spannung im Beton}}{\text{Würfel Festigkeit des Beton}}$	0,87	1,24	1,40	1,42	1,33
Zur Erzielung einer dreifachen Sicherheit gegen Bruch wäre die zulässige Eisen- spannung	1,25	1,08	0,95	0,88	0,73 t/cm ²
und die zulässige Betondruckspannung	97	110	123	125	116 kg/cm ²
Für eine zulässige Spannung 1 t/cm ² im Eisen ist die Druckspannung im Beton	77,5	102	130	142	158 „
Die übliche zulässige Betondruckspannung von 40 kg/cm ² wird überschritten im					
Verhältnis: $\frac{\sigma \text{ effektiv}}{\sigma \text{ zulässig}}$	1,94	2,55	3,25	3,54	3,94
Effektiver Sicherheitsgrad beim Bruch wenn $\sigma_{\text{eisen}} = 1 \text{ t/cm}^2$ massgebend	3,76	3,23	2,84	2,64	2,20
Die <i>ersten Risse</i> sind aufgetreten unter einem Biegemoment (Mittel)	29	34	44	44	49 cmt
Verhältnis zum Biegemoment beim Bruch	0,282	0,267	0,295	0,280	0,328
Spannung im Eisen bei den ersten Rissen (gleichzeitig Sicherheitsgrad gegen das Auftreten der Risse)	1,06	0,86	0,84	0,74	0,72 t/cm ²

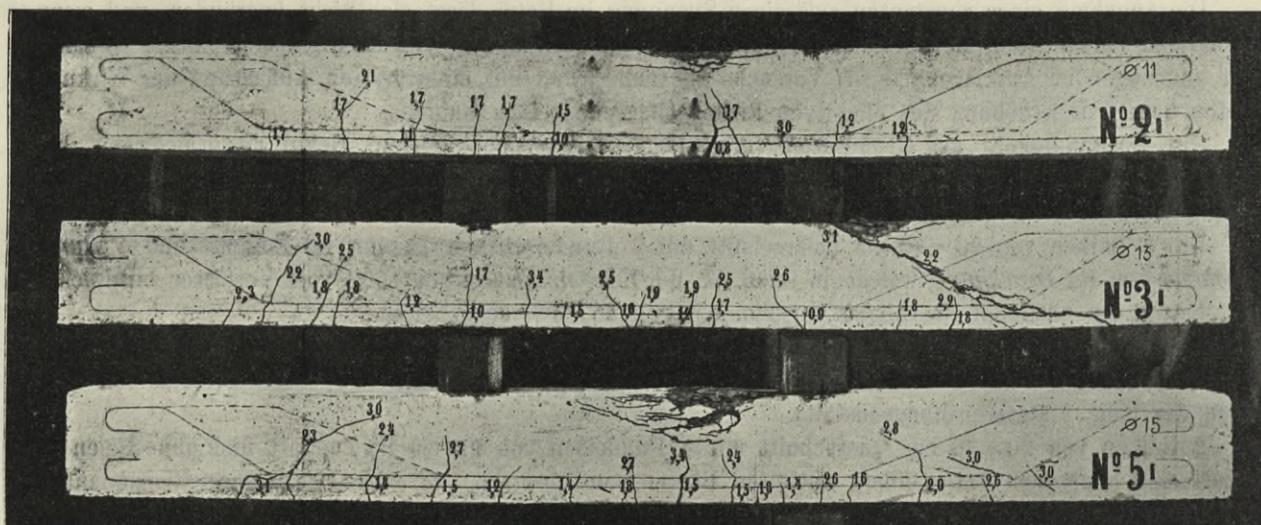


Abb. 4

Wird die Frage des Auftretens der ersten Risse bei Seite gelassen, indem dieselbe mit dem effektiven Sicherheitsgrad gegen Bruch nicht in unmittelbarer Beziehung steht und das Zahlenmaterial, welches sich auf den Bruch der Balken bezieht, näher untersucht, so erhält man ein Gesamtbild desselben am besten durch Ausdehnung der Ergebnisse auf Balken mit schwächerer Armierung; derartige Versuche mit Armierungseisen unter 1,68 % des Nutzquerschnittes des Beton gibt es so viele, dass die zu gewärtigenden Bruchbelastungen mit hinreichender Schärfe auch auf die gewählten Balkenabmessungen sich übertragen lassen, vorausgesetzt, dass die Streckgrenze des Eisens bekannt sei.

Für Balken ohne Armierung gibt die Methode, welche Risse voraussetzt, eine Tragfähigkeit gleich Null, die geringste Tragkraft entspricht jedoch der effektiven Biegezugfestigkeit des Beton, in unserem Falle im Durchschnitt 45 kg/cm^2 , entsprechend einem Biegemoment in Balkenmitte von 20,25 cmt oder einer Last $P = 0,405 \text{ t}$ auf eine Presse.

Die Abbildungen 5 und 6 geben die Verhältnisse beim Bruch für Balken von 0 bis 5 % Armierung an.

Die Auftragung der *Biegemomente* (Abb. 5) zeigt, dass bis 3 % Armierung die Biegemomente vor dem Bruch das Dreifache der Momente für die zulässige Spannung 1 t/cm^2 im Eisen überschreiten; das Mass der Ueberschreitung hängt von den effektiven Streckgrenzen der verwendeten Stangen ab; Eisen mit kleinerem Durchmesser haben meistens durch das Walzen bei etwas niedriger Temperatur höhere Streckgrenzen; aus diesem Umstand wäre auch die Armierungsgrenze von 3 % je nach der Streckgrenze nach oben oder unten etwas zu verschieben.

Das Dreifache der zulässigen Druckspannung im Beton wird erreicht, wie bereits eingangs erwähnt, bei 0,58 % Armierung.

Die Darstellung der *Spannungen im Eisen* vor dem Bruch und an der Streckgrenze und des Dreifachen der zulässigen Spannung im Eisen (Abb. 6) zeigt wiederum, dass oberhalb 3 % Armierung durch vorzeitige Zerstörung der Balken infolge ungenügender Druckfestigkeit event. auch Scheerfestigkeit des Beton die Streckgrenze nicht erreicht wird, somit eine 3-fache Sicherheit nicht vorhanden ist. Die zulässige Spannung von 1 t/cm^2 im Eisen ist in solchen Fällen zu hoch und sollte erniedrigt werden.

Am lehrreichsten ist die Darstellung der *Druckspannungen im Beton* (Abb. 6); sie zeigt, wie unwirtschaftlich dieses Material verwendet wird, wenn man an einer niedrigen constanten zulässigen Druckspannung festhält. Erst oberhalb 3 % Armierung kann im vorliegenden Falle rechnerisch ein Zerdrücken des Beton eintreten; bis zu dieser Grenze ist aber die effektive Sicherheit nur durch die Streckgrenze des Eisens bedingt, und oberhalb dieser Grenze bleibt immerhin die Druckspannung vor dem Bruch höher wie die Würfelfestigkeit des Beton.

Die Ansicht, es sei in diesem Diagramm doch der Beweis erbracht, dass bei schwächerer Armierung die effektiven Druckspannungen vor dem Bruch wesentlich kleiner und somit die Sicherheit grösser, ist nicht stichhaltig, indem die aufgetragenen Spannungen nach der Methode berechnet werden, welche eine bestimmte constante Lage der Nulllinie voraussetzt; im letzten Momente steigt jedoch durch Oeffnen der mittleren Risse die Nulllinie gegen den Druckgurt rasch, bis ein Zerdrücken doch eintritt und zwar ohne namhafte Erhöhung der Balkenbelastung.

Die Annahme einer constanten zulässigen Spannung im Beton lässt sich nicht begründen, und wenn alle bisherigen Vorschriften, Leitsätze und Verordnungen dennoch diesen Weg eingeschlagen haben, so hängt das mit ungenügender Aufklärung durch Versuche zusammen und mit einer irrigen Auffassung der Wirkung des Beton bezüglich Erhöhung des effektiven Sicherheitsgrades eines Balkens.

Die Notwendigkeit, auf Grund von Vorschriften Druckspannungen im Beton zu erniedrigen, hat dazu geführt, Eiseneinlagen im Druckgurt anzubringen; dass der Sicherheitsgrad dadurch nicht oder kaum nennenswert erhöht wird, geht aus folgenden Versuchsergebnissen hervor:

Die 3 Balken von 20×30 cm Querschnitt mit 4 Rundeisen von 15 mm im Zuggurt und 4 *Rundeisen* von 15 mm im Druckgurt, welche in Band XL der Schweiz. Bauzeitung 1902 vom Verfasser besprochen wurden, hatten ein mittleres Bruchbelastungsmoment von 581 cmt ausgehalten.

2 Balken von 20×30 cm Querschnitt mit 4 Rundeisen von 15 mm im Zuggurt und *ohne Eisen im Druckgurt* sind gebrochen unter einem mittleren Biegemoment von 574 cmt (10. Heft der Mitteilungen der eidg. Materialprüfungsanstalt).

2 Balken von 20×30 cm Querschnitt mit 4 Rundeisen von 22 mm im Zuggurt und ohne Eisen im Druckgurt sind gebrochen unter einem mittleren Biegemoment von 921 cmt. Das Gesamt-Eisenquantum entsprach annähernd dem Gesamtquantum in den 3 vorhin erwähnten im Druckgurt auch armierten Balken.

Nach dem 12. Heft unserer Mitteilungen sind 6 Monate alte Balken von 20×33 cm Querschnitt mit 7,07 und 15,2 cm² Armierungsquerschnitt des Zuggurtes gebrochen unter einem Biegemoment von 574 und 1130 cmt im Mittel aus je 2 Versuchen.

Will man daher den Sicherheitsgrad eines Balkens gegen Bruch erhöhen, so geschieht dies in wirksamer Weise nur durch Erniedrigung der Spannung im Eisen und nicht durch eine Erniedrigung der Druckspannungen im Beton. Das bisher im Druckgurt einverleibte Eisen ist viel nützlicher auch in geringerem Quantum, wenn es in den Zuggurt gesetzt wird.

In welcher Weise lassen sich die Ergebnisse vorliegender Untersuchung bei Aufstellung neuer Vorschriften verwerten? Eine Einschränkung der rechnerisch ermittelten Druckspannung ist immer noch angezeigt für Hourdisplatten im Hochbau, bei welchen die Armierung selten mehr wie 1% beträgt; denn mit Rücksicht auf die geringe Plattendicke im Vergleich zur Stützweite lassen sich dadurch stärkere Einsenkungen vermeiden. Bei Balken T-förmigen Querschnittes ist auch durch die Unsicherheit in der wirksamen Druckgurtbreite eine Einschränkung geboten. Für solche Fälle kann man an den üblichen 40 kg/cm² festhalten.

Für Eisenbetonplatten bei Strassen und Eisenbahnbrücken, für Balken rechteckigen Querschnittes, deren Breite die Höhe in der Regel nicht erreicht, für Rippen von T-Balken in der Nähe der Stützen zur Aufnahme der negativen Biegemomente, darf aber die zulässige Druckspannung höher angesetzt werden, wenn gleichzeitig die Spannung im Eisen etwas erniedrigt wird. Im Entwurfe für die neuen Vorschriften wurde daher der schweizerischen Commission des armierten Beton vom Verfasser vorgeschlagen, die zulässige Druckspannung nach der Formel

$$\sigma_{\text{beton}} = 40 + 0,1 (1000 - \sigma_{\text{eisen}}) \text{ kg/cm}^2$$

festzusetzen. Wird die zulässige Eisenspannung von 1000 bis 600 kg/cm² vermindert, so darf die zulässige Druckspannung von 40 bis 80 kg/cm² erhöht werden. Es sind das Zahlen, welche ohne Bedenken zugelassen werden sollten, indem die Verstärkung der Eisenarmierung einem wirklichen Erhöhen des Sicherheitsgrades entspricht.

Allerdings sind hohe Zahlen für die zulässige Spannung im Druckgurt nur zu empfehlen, wenn genügende Vorsorge gegen den schädlichen Einfluss der Scheerkräfte getroffen wird, sonst treten schiefe Abscherungsrisse ein, welche bald die Höhe des wirksamen Druckgurtquerschnittes auf ein gefährliches Mass reduzieren oder plötzlichen Bruch herbeiführen.

Innerhalb welcher Grenzen die Festigkeit eines Balkens gegen die Zerstörung durch Scheerkräfte variieren kann, geht aus dem Vergleich der *mittleren Scheerspannung*, berechnet als Quotient der Scheerkraft durch den Betonquerschnitt von der Balken- resp. Rippenbreite und der Höhe zwischen Zug- und Druckcentrum, hervor.

Diese Spannung τ , ermittelt ohne Rücksicht auf das Vorhandensein von Eiseneinlagen, kann nach Versuchen der eidg. Materialprüfungsanstalt bei älterem Beton und gut angeordneter Armierung bis 42 kg/cm² betragen. Bei den vorliegenden Versuchen mit 3 Monate altem Beton wurden Scheerspannungen τ bis zu 27 kg/cm² ausgehalten.

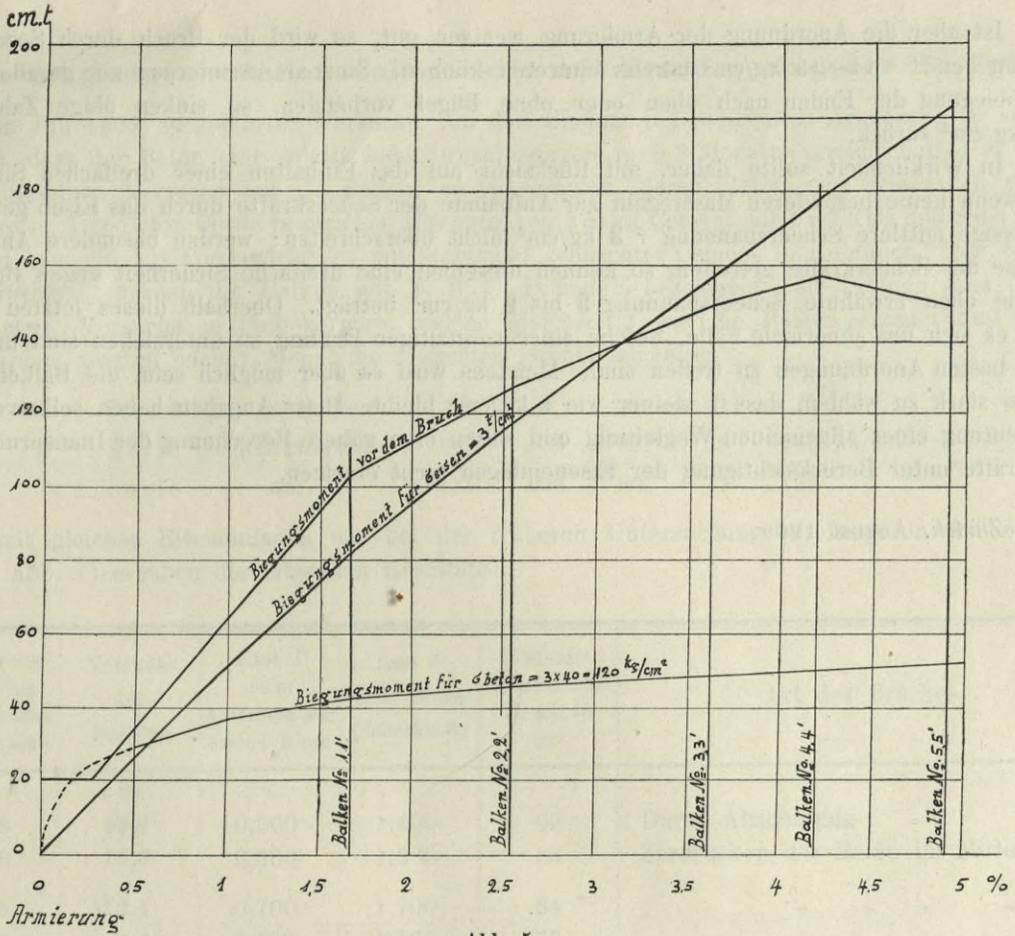


Abb. 5

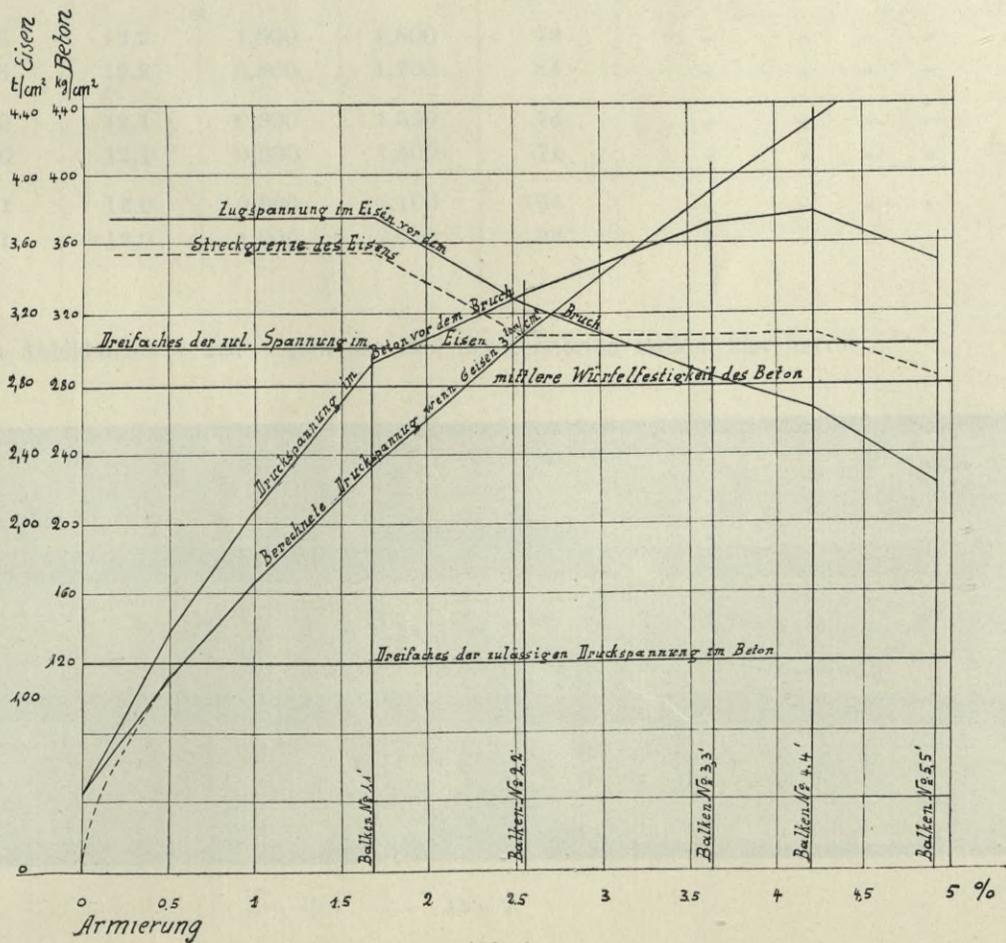


Abb. 6

Ist aber die Anordnung der Armierung weniger gut, so wird der Bruch durch Scheerkräfte nach 6 Wochen bei $\tau = 14-15 \text{ kg/cm}^2$ bereits eintreten können. Sind als Armierung nur gerade Eisenstangen, ohne Abbiegung der Enden nach oben oder ohne Bügel vorhanden, so sinken obige Zahlen leicht auf $8-10 \text{ kg/cm}^2$ zurück.

In Wirklichkeit sollte daher, mit Rücksicht auf das Einhalten einer dreifachen Sicherheit gegen Bruch, wenn keine besonderen Massregeln zur Aufnahme der Scheerkräfte durch das Eisen getroffen werden, die zulässige mittlere Scheerspannung τ **3** kg/cm^2 nicht überschreiten; werden besondere Anordnungen zur Aufnahme der Scheerkräfte getroffen, so können dieselben eine dreifache Sicherheit gegen Bruch gewähren, wenn die oben erwähnte Scheerspannung **5** bis **9** kg/cm^2 beträgt. Oberhalb dieses letzten Wertes von τ handelt es sich um abnormale Fälle, welche einer sorgfältigen Prüfung zu unterziehen sind und bei welchen nur die besten Anordnungen zu treffen sind. Meistens wird es aber möglich sein, die Balken- oder Rippenbreite so stark zu wählen, dass τ kleiner wie 9 kg/cm^2 bleibt. Diese Angaben haben selbstverständlich nur die Bedeutung einer allgemeinen Wegleitung und sollen eine nähere Berechnung der Inanspruchnahme durch Scheerkräfte unter Berücksichtigung der Eiseneinlagen nicht ersetzen.

Zürich, August 1908.

Untersuchung einer zweiten Balkenserie mit Beton geringerer Festigkeit.

Die im Juli 1908 ausgeführten Versuche, um den Einfluss der steigenden Armierung zu verfolgen, haben erwiesen, dass der Beton eine relativ hohe Druckfestigkeit nach 3 Monaten erreicht hatte; es erschien zweckmässig, dieselben Versuche mit 10 Balken zu wiederholen, deren Beton eine wesentlich geringere Festigkeit aufweise. Der Beton wurde in gleicher Mischung von 270 kg Cement auf 1 m³ Kies und Sand erzeugt; als Bindemittel kam ein aus Portlandcement mit Steinmehl gemischter Cement in Gebrauch. Den Nummern 1 bis 5 entsprechend, wurden die Balken mit A, B, C, D und E bezeichnet; die Prüfung fand im Alter von 1 Monat statt. Versuche an Probekörpern, welche gleichzeitig wie die Balken erzeugt und daneben aufbewahrt wurden, zeigten nach 1 Monat die folgenden Druckfestigkeiten:

Probekörper zu Balken	A	B	C	D	E
1. Serie <i>Druckfestigkeit</i>	113	105	65	55	143 kg/cm ²
2. Serie <i>do.</i>	114	108	80	74	132 „

Die mit gleichen Eiseneinlagen wie bei der früheren Untersuchung in derselben Art erprobten Balken (siehe Abb. 1) ergaben die folgenden Resultate:

Balken	Armierung in % des Nutzquerschn. des Beton	Nutzhöhe des Balkens	Last P beim Auftreten der ersten Risse	Last P beim Bruch (Scherkraft)	Biegemoment beim Bruch in cmt	Art des Bruches
		cm	t	t		
A	1,68	12,6	0,500	1,400	69	Durch Abscherung Zerdrücken des Beton im Mittelfeld
A ₁	1,68	12,6	0,600	1,680	83	
B	2,55	12,4	0,700	1,700	84	„ „ „ „ „
B ₁	2,55	12,4	0,700	1,560	77	
C	3,63	12,2	1,000	1,600	79	„ „ „ „ „
C ₁	3,63	12,2	0,800	1,700	84	
D	4,20	12,1	0,900	1,500	74	„ „ „ „ „
D ₁	4,20	12,1	0,900	1,500	74	
E	4,91	12,0	0,800	2,100	104	„ „ „ „ „
E ₁	4,91	12,0	1,000	2,000	99	

Aus den Abbildungen 7 und 8 geht das Bild der zerstörten Balken klar hervor.

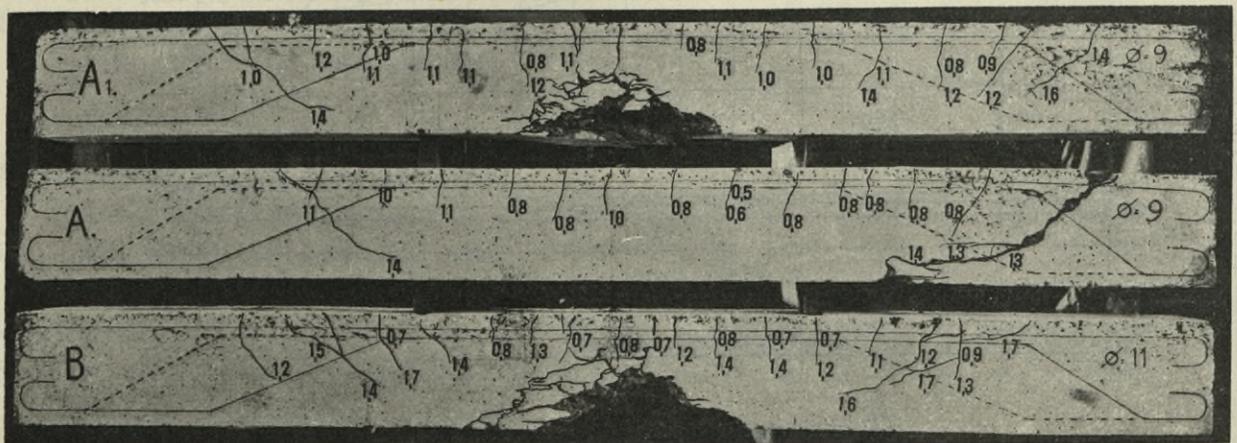


Abb. 7

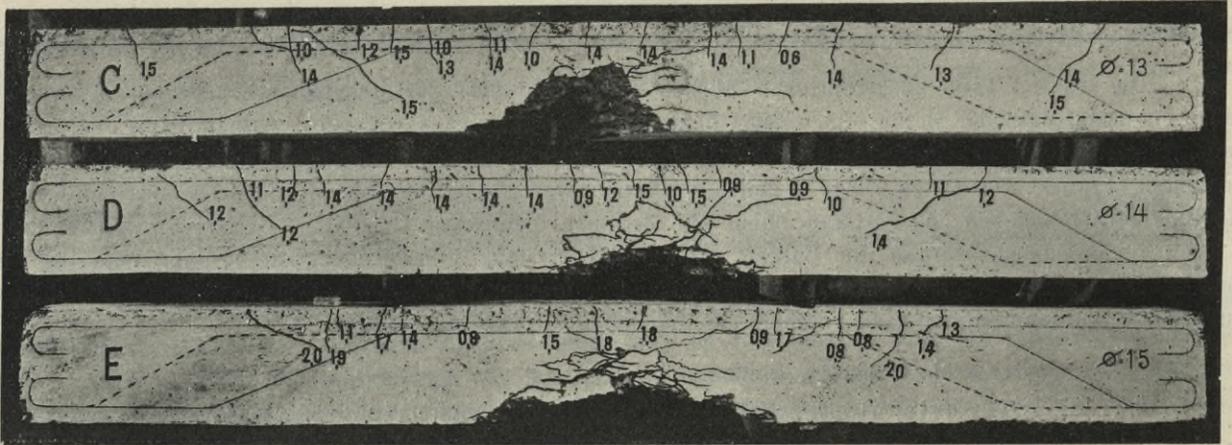


Abb. 8

Es wurden an drei Balken gleichzeitig mit den Durchbiegungsmessungen auch Dehnungsmessungen im mittleren Felde zur Feststellung der Lage der Nulllinie durchgeführt und zwar in ähnlicher Weise wie bei Balken 2¹ der ersten Serie. In Abbildung 9 sind für die wachsenden Belastungen die entsprechenden Lagen der Nulllinie der drei Balken B₁, C₁, E₁ veranschaulicht. Es geht aus dem Vergleich mit den für verschiedene Werte von n rechnerisch ermittelten Ordinaten der Nulllinie hervor, dass die höchste Lage der Nulllinien beim Auftreten der ersten Risse eintrat und annähernd dem Werte $n = 15$ entspricht; bei den drei Balken sinkt nachher die neutrale Axe, sodass für die weitere Berechnung des Spannungszustandes ein grösserer Wert für n anzunehmen ist; es wurde $n = 20$ gewählt.

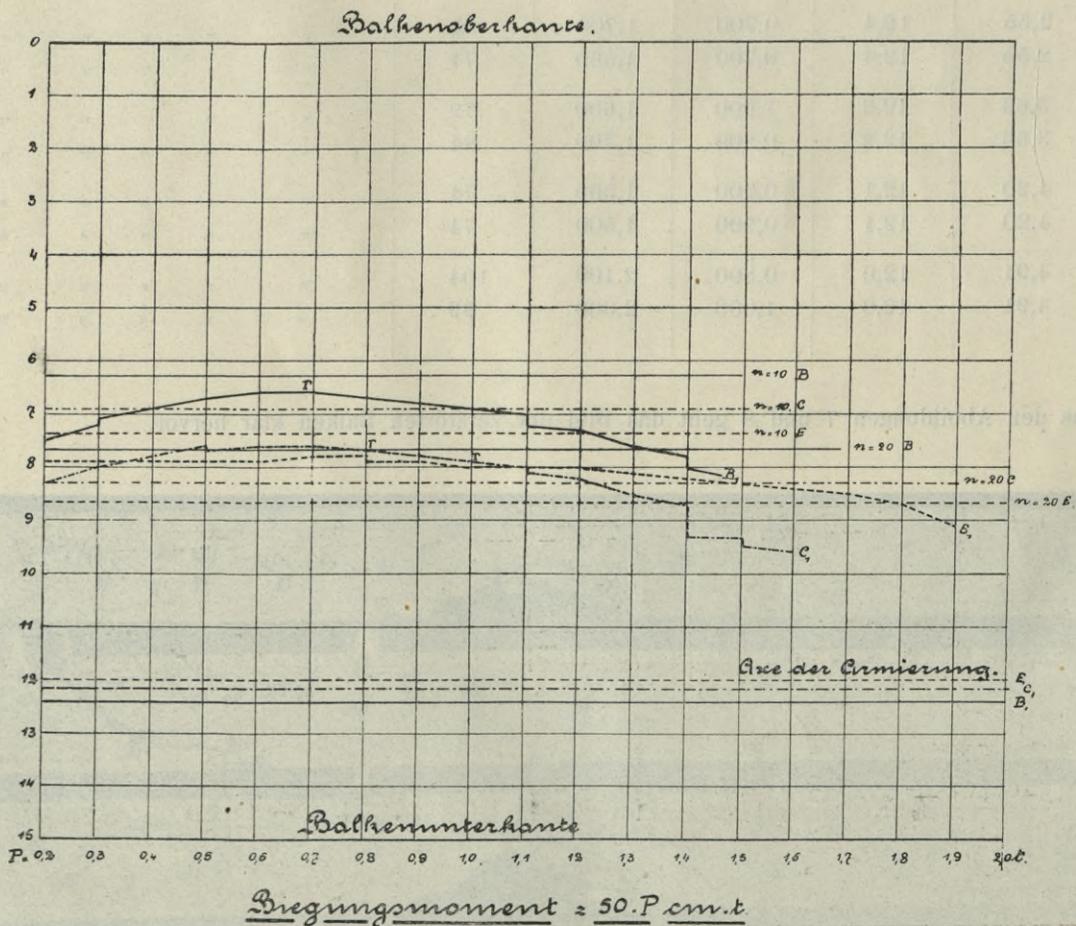


Abb. 9

Balken E₁, C₁, B₁ Lage der Nulllinie.

Das Sinken der Nullaxe bei zunehmender Belastung ist eine Erscheinung, welche bei Balken mit Beton geringerer Festigkeit zu erwarten ist; es sei erinnert an die Balken Nr. 11, 12, 13 in Heft 10 der Mitteilungen der eidg. Materialprüfungsanstalt (Fig. 9, Seite 97). Die Druckspannungen im Beton nähern sich sehr bald der Bruchfestigkeit und veranlassen grössere Deformationen als wie bei Balken aus gutem, erhärtetem Beton. Es ist auch zu erwarten, dass das Verteilungsgesetz der Druckspannungen von der Nullaxe aus nicht linear erfolge, wie dies bei gutem Beton annähernd der Fall ist, sondern dass der Zuwachs der Längenänderungen gegen die Aussenkante des Balkens grösser wie der Zuwachs der Spannungen werde. Das Verhältnis zwischen berechnete Druckspannung unmittelbar vor der Zerstörung und Würfel Festigkeit des Beton wird demgemäss viel grösser in der vorliegenden Serie ausfallen.

Die Resultate der Berechnungen und Vergleiche sind in folgender Zusammenstellung enthalten:

	Balken-Bezeichnung				
	A	B	C	D	E
Armierung 4 Eisen Durchmesser	9	11	13	14	15 mm
Querschnitt der Armierung	2,54	3,80	5,31	6,10	7,07 cm ²
Nutzhöhe der Balken	12,6	12,4	12,2	12,1	12,0 cm
Abstand der Nulllinie von der Druckgurt- oberkante ($n = 20$)	6,90	7,72	8,30	8,52	8,71 cm
Abstand von Zug- und Druckcentrum	10,30	9,83	9,43	9,26	9,10 cm
Biegemoment beim Bruch (Mittel)	76	80	82	74	101 cmt
Kraft im Eisen	7,37	8,14	8,70	8,00	11,1 t
Spannung im Eisen	2,90	2,13	1,64	1,31	1,56 t/cm²
Druckspannung im Beton	184	176	175	155	207 kg/cm²
Streckgrenze des Eisens	3,55	3,07	3,06	3,09	2,82 t/cm ²
Würfel Festigkeit des Beton (Mittel)	113	106	72	64	137 kg/cm ²
Verhältnis: $\frac{\text{Spannung im Eisen}}{\text{Streckgrenze des Eisens}}$	0,82	0,70	0,54	0,42	0,55
Verhältnis: $\frac{\text{Spannung im Beton}}{\text{Würfel Festigkeit des Beton}}$	1,63	1,66	2,43	2,42	1,51
Zur Erzielung einer dreifachen Sicherheit gegen Bruch wäre die zulässige Eisen- spannung	0,93	0,71	0,55	0,44	0,52 t/cm ²
und die zulässige Betondruckspannung	61	59	58	52	69 kg/cm ²
Für eine zulässige Spannung 1 t/cm ² im Eisen ist die Druckspannung im Beton	63,5	82,4	107	118	132 kg/cm ²
Die übliche zulässige Betondruckspannung von 40 kg/cm ² wird überschritten im Verhältnis: $\frac{\sigma \text{ effektiv}}{\sigma \text{ zulässig}}$	1,52	1,47	1,45	1,30	1,72
Effektiver Sicherheitsgrad beim Bruch wenn $\sigma_{\text{Eisen}} = 1 \text{ t/cm}^2$ massgebend	2,90	2,13	1,64	1,31	1,56
Die <i>ersten Risse</i> sind aufgetreten unter einem Biegemoment (Mittel)	27	34	44	44	44 cmt
Verhältnis zum Biegemoment beim Bruch Spannung im Eisen bei den ersten Rissen (gleichzeitig Sicherheitsgrad gegen das Auftreten der Risse)	0,356	0,425	0,537	0,596	0,436
	1,03	0,91	0,88	0,78	0,68

Aehnlich wie in den Abbildungen 5 und 6 sind die Verhältnisse der zweiten Serie beim Bruch für Balken von 0 bis 5% Armierung verwertet worden. Durch die geringe Druckfestigkeit des Beton ergeben sich gegenüber der ersten Serie die folgenden Aenderungen: nur bis 1,6% Armierung sind die Biegemomente vor dem Bruch grösser wie das Dreifache der Momente für die zulässige Spannung 1 t/cm² im Eisen; oberhalb 1,6% Armierung wird durch ungenügende Druckfestigkeit event. auch Scherfestigkeit des Beton die Streckgrenze im Eisen nicht erreicht. Es ist die Streckgrenze des Eisens zur Ermittlung des wirklichen Sicherheitsgrades nicht mehr massgebend, sondern die Druckfestigkeit des Beton.

Der Vergleich der berechneten Druckspannungen im Beton unmittelbar vor dem Bruch mit der zulässigen Spannung von 40 kg/cm² ergibt im Mittel ein Sicherheitsgrad nach 1 Monat, in den Balken

A	B	C	D	E
4,6	4,4	4,4	3,9	5,2;

der Vergleich der Würfelfestigkeit des Beton mit der zulässigen Spannung von 40 kg/cm² würde als Sicherheitsgrad ergeben:

2,8	2,6	1,8	1,6	3,4
-----	-----	-----	-----	-----

mit Rücksicht auf das Eisen ist jedoch der absolute Sicherheitsgrad nur

2,9	2,1	1,64	1,31	1,56
-----	-----	------	------	------

Es geht aus diesen Zahlen hervor, dass die Sicherheitsverhältnisse der erprobten Balken sich wesentlich günstiger gestaltet haben als nach der Würfelfestigkeit des Beton hätte angenommen werden können. Der Unterschied hat seine Ursache in der Verteilungsweise der Spannungen im Druckgurt; es findet durch die Teile, welche näher an der Nullaxe liegen, eine Entlastung der an der Aussenkante liegenden Zone und im Augenblicke des Bruches eine Vergrösserung des Druckgurttes durch weiteres Sinken der Nullaxe statt.

Sowohl das Alter der Balken der zweiten Serie wie die Verwendung eines gemischten Cementes bilden einen abnormal ungünstigen Fall, welcher wohl belehrend, sich jedoch auf die Verhältnisse der Praxis nur selten übertragen lässt.

Die Durchbiegungen in Balkenmitte.

Die Resultate der Durchbiegungsmessungen in Balkenmitte, korrigiert um das arithmetische Mittel der vertikalen Bewegungen an den Auflagerpunkten, sind in nachfolgender Tabelle (Seite 14) für typische Belastungsfälle zusammengestellt; die erste Zahl entspricht dem einen, die zweite Zahl darunter dem zweiten Balken derselben Serie. In Abb. 10 geht aus den starken Linien der Verlauf der Durchbiegungen der Balken der ersten Serie und zwar als Mittelwert der Durchbiegungen der beiden gleich stark armierten Balken hervor. Das Beobachtungsmaterial liefert Anhaltspunkte, um einige Fragen ihrer Lösung näher zu bringen.

Welches ist das Verhältnis der Einsenkungen bei den einzelnen Belastungsstufen für die verschieden armierten Balken?

Nachstehende Tabelle (Seite 15) gibt in Prozenten die Einsenkungen der einzelnen Balken bei verschiedenen Belastungsstufen an, wenn die Einsenkungen der schwächsten Balken 1 und A mit 1,68% Armierungseisen als Vergleichszahl = 100 gesetzt werden.

Effektive und berechnete Durchbiegungen in Balkenmitte in Millimeter.

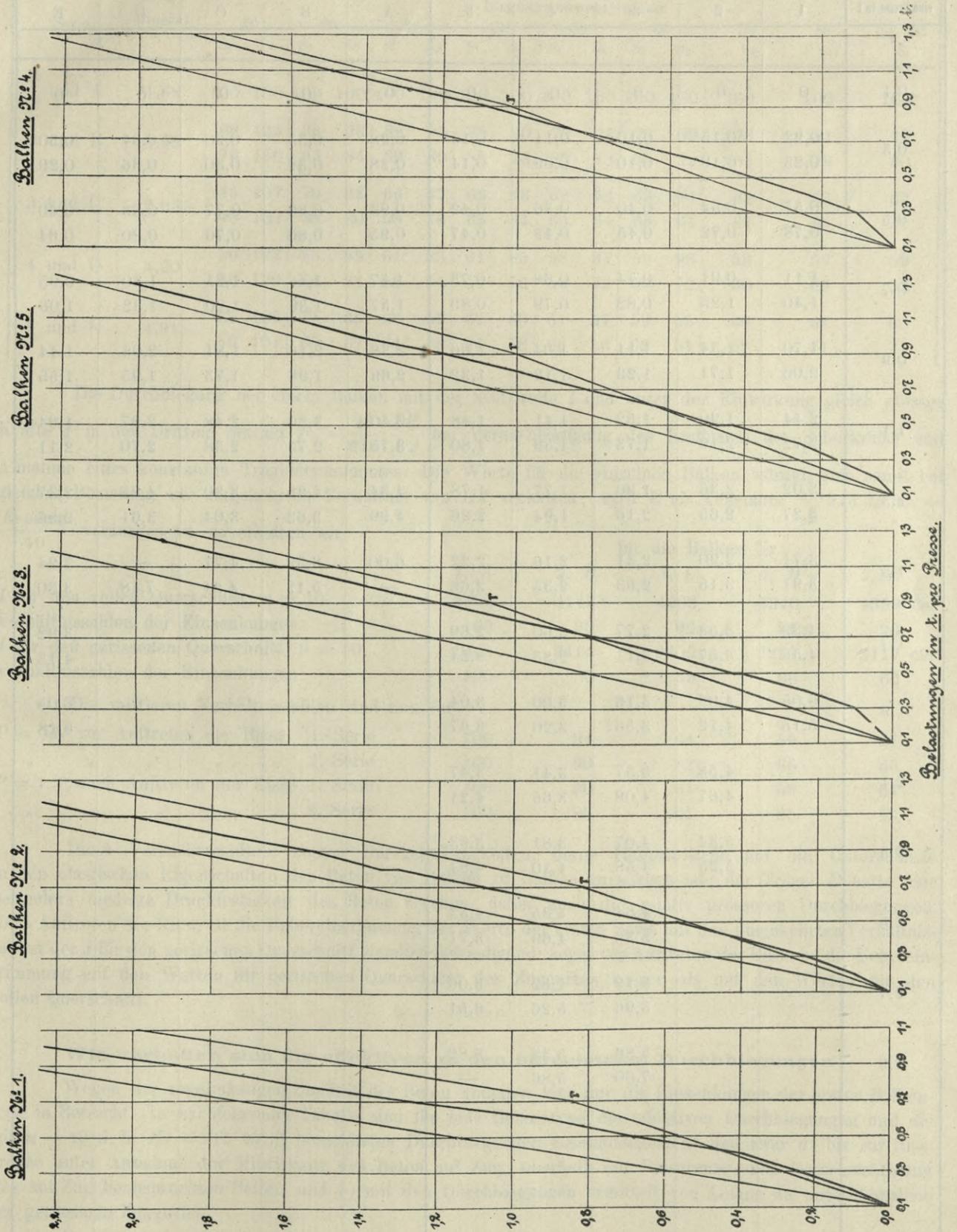


Abb. 10

Durchbiegungen in Trägermitte in mm.

Belastung auf eine Presse in t	Erste Serie. Balken Nr.					Zweite Serie, Balken				
	1	2	3	4	5	A	B	C	D	E
t										
0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,3	0,22	0,15	0,10	0,11	0,15	0,28	0,35	0,30	0,34	0,30
	0,25	0,19	0,10	0,09	0,14	0,28	0,39	0,30	0,36	0,29
0,5	0,57	0,54	0,40	0,36	0,42	0,93	0,89	0,77	0,83	0,60
	0,78	0,72	0,45	0,42	0,47	0,95	0,80	0,76	0,80	0,64
0,7	1,11	0,91	0,74	0,68	0,73	1,57	1,46	1,21	1,30	0,95
	1,40	1,25	0,82	0,79	0,89	1,57	1,39	1,20	1,32	1,06
0,9	1,70	1,34	1,11	1,04	1,06	2,38	2,16	1,81	2,03	1,44
	2,06	1,71	1,29	1,12	1,32	2,69	1,98	1,73	1,95	1,55
1,1	2,44	1,90	1,52	1,41	1,48	3,40	3,20	2,48	2,97	1,94
	2,72	2,19	1,73	1,59	1,80	3,75	2,73	2,38	2,70	2,11
1,3	3,02	2,36	1,90	1,77	1,78	4,34	4,28	3,20	4,25	2,37
	3,27	2,65	2,16	1,94	2,26	4,99	3,62	3,04	3,61	2,56
1,5	3,71	2,90	2,31	2,16	2,22	6,00	8,39	4,71	—	3,24
	3,91	3,15	2,63	2,33	2,68	—	5,12	4,21	7,48	3,30
1,7	4,39	3,53	2,77	2,60	2,69					3,92
	4,56	3,57	3,11	2,83	3,24					4,13
1,9	5,05	4,02	3,16	3,00	3,04					6,05
	5,15	4,12	3,56	3,20	3,67					6,18
2,1		4,58	3,57	3,41	3,47					
		4,67	4,08	3,65	4,21					
2,3		5,34	4,07	3,81	3,93					
		5,25	4,58	4,10	4,84					
2,5			4,64	4,35	4,53					
			5,36	4,69	5,71					
2,7			5,19	4,82	5,06					
			5,96	5,26	6,51					
2,9			5,86	5,38	5,89					
			7,60	5,86	—					

Balken Nr.	Armie- rungs- prozent	Belastung von $P=0.1^t$ bis $P=$														
		0.3		0.5		0.7		0.9		1.1		1.3		1.5	1.7	1.9 ^t
		Biegemoment in cm ^t														
1	2	10		20		30		40		50		60		70	80	90 cm ^t
		S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₁	S ₁
1 und A	1,68	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2 und B	2,55	68	125	95	96	82	93	79	90	78	94	78	99	78	81	79
		76	140	93	84	89	89	83	73	80	73	81	72	81	78	80
3 und C	3,63	45	107	70	83	66	77	65	76	62	73	63	74	62	63	62
		40	107	58	80	58	76	63	64	63	64	66	61	67	68	69
4 und D	4,20	50	122	63	89	61	83	61	85	58	87	59	98	58	59	59
		36	129	54	84	56	84	54	72	58	72	59	72	60	63	62
5 und E	4,91	68	107	74	65	66	61	62	60	61	57	59	55	60	61	60
		56	104	60	67	64	68	64	58	66	56	69	51	69	71	71

Die Durchbiegung bei einem Balken mit der Stützweite l und unter der Einwirkung gleich grosser Kräfte P in den Dritteln beträgt $f = \frac{23}{648} \cdot \frac{Pl^3}{EJ}$ bei Vernachlässigung des Einflusses der Scherkräfte und Annahme eines konstanten Trägheitsmomentes. Die Werte für die einzelnen Balken würden sich somit bei gleicher Belastung im umgekehrten Verhältnis von EJ verhalten; wird E als konstante $= 215 \text{ t/cm}^2 = \frac{E\text{-eisen}}{10}$ vorausgesetzt, so erhalten wir

	für die Balken Nr.				
	1, A	2, B	3, C	4, D	5, E
J für den vollen Querschnitt, $n = 10$	3956	4143	4283	4340	4399 cm ⁴
Verhältniszahlen der Einsenkungen	100	95	92	91	90
J für den gerissenen Querschnitt, $n = 10$	1943	2414	2806	2957	3117 cm ⁴
Verhältniszahlen der Einsenkungen	100	80	69	66	62

Die mittleren Verhältniszahlen sind nun für

$P = 0,5^t$ vor Auftreten der Risse	1. Serie	100	94	64	59	67
" " " " "	2. Serie	100	90	82	86	66
$P = 1,3^t$ nach Auftreten der Risse	1. Serie	100	80	65	59	64
" " " " "	2. Serie	100	85	67	85	53

Diese Versuchsergebnisse zeigen Unregelmässigkeiten, deren Hauptursache auf die Unterschiede in den elastischen Eigenschaften des Beton von Balken zu Balken zu suchen ist; der Träger D hatte eine besonders niedrige Druckfestigkeit des Beton ergeben, daher auch die relativ grösseren Durchbiegungen. Nach Auftreten der Risse ist die Uebereinstimmung der Werte der ersten Serie mit den umgekehrten Verhältniszahlen der J für den gerissenen Querschnitt ziemlich befriedigend; sogar vor Auftreten der Risse ist die Uebereinstimmung mit den Werten für gerissenen Querschnitt des Zuggurtes besser als mit den Werten für den vollen Querschnitt.

Wie verhalten sich die effektiven zu den berechneten Durchbiegungen?

Wegen der regelmässigen Qualität des Beton kommen hier nur die Einsenkungen der ersten Balkenserie in Betracht. In nachfolgender Tabelle sind für jede Balkentyp die effektiven Durchbiegungen und die mit $n = 10$ d. h. $E_b = 215 \text{ t/cm}^2$ berechneten Durchbiegungen zusammengestellt und zwar $a)$ bis zur Rissgrenze unter Annahme der Mitwirkung des Beton auf Zug, oberhalb der Rissgrenze ohne Berücksichtigung des auf Zug beanspruchten Beton; und $b)$ mit den Durchbiegungen ermittelt von Anfang an unter Annahme des gerissenen Zuggurtes.

Die fett gedruckten Zahlen entsprechen dem vollen Querschnitt des Balkens. Die effektiven Durchbiegungen sind bei der ersten Belastungsstufe kleiner wie die berechneten, für die höheren Stufen liegt die effektive Durchbiegung zwischen den berechneten Werten nach Annahmen a und b .

Durchbiegungen in mm.

Belastungs- stufe P in t	Balken Nr. 1			Balken Nr. 2			Balken Nr. 3			Balken Nr. 4			Balken Nr. 5		
	effek- tiv	berechnet a	b												
0,1—0,3	0,235	0,28	0,58	0,17	0,27	0,46	0,10	0,26	0,40	0,10	0,26	0,38	0,14	0,25	0,35
0,1—0,5	0,675	0,56	1,14	0,63	0,54	0,93	0,42	0,53	0,81	0,39	0,51	0,75	0,44	0,50	0,71
0,1—0,7	<i>1,255</i>	0,84	1,72	<i>1,08</i>	0,81	1,40	0,78	0,80	1,21	0,74	0,77	1,14	0,81	0,74	1,05
0,1—0,9	1,88	1,41	2,29	1,52	1,27	1,86	<i>1,20</i>	1,06	1,62	<i>1,08</i>	1,02	1,50	<i>1,19</i>	1,00	1,41
0,1—1,1	2,58	1,98	2,87	2,05	1,73	2,32	1,63	1,46	2,02	1,50	1,40	1,89	1,64	1,35	1,76
0,1—1,3	3,14	2,56	3,45	2,55	2,20	2,79	2,03	1,86	2,42	1,85	1,78	2,28	2,02	1,71	2,12
0,1—1,5	3,81	3,14	4,01	3,03	2,66	3,26	2,47	2,27	2,83	2,25	2,15	2,65	2,45	2,06	2,47
0,1—1,7	4,48	3,71	4,58	3,55	3,13	3,73	2,94	2,67	3,23	2,72	2,53	3,02	2,96	2,41	2,81
0,1—1,9	5,10	4,28	5,16	4,07	3,60	4,18	3,36	3,08	3,64	3,10	2,91	3,40	3,36	2,77	3,17

Die Abb. 10 veranschaulicht diese Ergebnisse. Eine parallele Verschiebung des zweiten Zweiges der Linien nach Annahme a , d. h. ein Versetzen der Risstelle unterhalb der beobachteten würde eine bessere Uebereinstimmung herbeiführen. Trotz den Unterschieden lassen sich diese Methoden mit genügender Genauigkeit in Fällen der Praxis anwenden.

Aus der Zusammenstellung ist zu ersehen, dass bei Beginn der Belastungsproben der volle Betonquerschnitt und ein grösseres Elastizitätsmodul für Beton als wie 215 t/cm^2 zu berücksichtigen wären; beim Auftreten der ersten Risse ist hingegen die Annahme, der Beton wirke auf Zug, nicht zutreffend; auch da wäre jedoch ein höherer Wert als $E_b = 215 \text{ t/cm}^2$ richtiger, namentlich wenn von den effektiven Einbiegungen der bleibende Teil noch in Abzug gebracht würde.

Da die erprobten Balken mit dem Verhältnis 1:10 von Höhe zur Stützweite auch für die Praxis Geltung haben, so seien noch die Verhältnisse von Durchbiegung zu Stützweite bei einer Beanspruchung des Eisens von 1 t/cm^2 und kurz vor dem Bruch angegeben; es gibt dies einen Masstab für die Bewertung von Belastungsproben in Bauwerken mit Balken rechteckigen Querschnittes bei freier Auflagerung:

	Balken Nr. 1	2	3	4	5
P für $\sigma_{\text{eisen}} = 1 \text{ t/cm}^2$	0,56	0,79	1,06	1,19	1,36 t
Durchbiegung	1,00	1,40	1,63	1,75	2,23 mm
Verhältnis zur Stützweite	1:1500	1:1070	1:920	1:860	1:670
Durchbiegung vor dem Bruch	5,10	5,30	6,70	5,60	5,90 mm
Verhältnis zur Stützweite	1:295	1:284	1:225	1:268	1:265

Endlich sei noch der Betrag der *bleibenden Durchbiegungen* bei einigen Belastungsstufen in *Prozenten der Gesamteinbiegungen* hier mitgeteilt:

Balken Nr.	1	1_1	2	2_1	3	3_1	4	4_1	5	5_1
Belastungsstufe 0,1—0,5 t	15,8	23,1	9,3	27,8	15,0	20,0	13,9	16,6	16,7	29,8
0,1—1,1	20,0	24,2	16,3	24,5	15,8	17,4	13,5	15,1	14,8	21,7
0,1—1,7	18,0	22,2	16,1	22,0	14,8	17,0	11,2	15,5	15,2	18,8
0,1—2,4	—	—	—	22,3	15,2	17,5	12,1	17,4	16,8	21,5

Diese Zahlen zeigen wie bei früheren Versuchen deutlich, dass von Balken zu Balken die Unterschiede in der Qualität des Beton einer genauen Bewertung der Durchbiegungen im Wege stehen. Bleibende Durchbiegungen sind im Anfang relativ grösser, als wie bei späteren erhöhten Belastungen der Mehrzahl der Balken.

Druckversuche mit Betonprismen.

1. Einleitung.

Im Bauwesen wird die Druckspannung eines künstlichen oder natürlichen Steinmaterials stets verglichen mit der an Würfeln ermittelten Druckfestigkeit; das Verhältnis des letzteren Wertes zum ersteren gilt als Sicherheitsgrad, ein Begriff, welcher öfters falsche Auffassungen veranlasst. Die wirklichen Zustände bei der Spannungsverteilung in längeren Prismen, die auf zentrischen Druck beansprucht sind, oder in breiten Prismen wie Druckgurplatten von Rippenbalken, welche ihre Beanspruchung nur auf der schmalen Breite der Rippen erhalten, sind noch nicht bekannt: sowohl der Einfluss der Länge, wie auch die Abnahme der Spannungen nach der Breite der Platten sind experimentell ungenügend untersucht.

Der Einfluss der Länge wird öfters durch eine nach der Knickformel konstruierten Gleichung berücksichtigt, obwohl bei Mörtel und Beton der eigentliche Knickvorgang nicht vorkommt und der Bruch durch schiefe Trennung oder Längsspaltung entsteht. Diese Umstände sind um so schwieriger zu prüfen, da bei Prismen und Säulen, deren Erzeugung vertikal stattfindet, ein gleichmässiges Stampfen und eine homogene Beschaffenheit kaum zu erzielen sind. So hat die französische Eisenbetonkommission infolge dieser Ursache bei Säulen mit fetterer Mischung kleinere Bruchfestigkeiten erhalten wie bei solchen mit magerer Mischung. Bevor der Einfluss der Armierung auf Betonsäulen zu einem abschliessenden Resultate gelangen kann, sollte das Verhalten von Mörtel- und Betonprismen verschiedener Höhe festgestellt werden.

Die Verteilung der Druckspannungen im Obergurt von Rippenbalken variiert nach der Höhe, d. h. nach dem Abstand von der neutralen Axe, nach der Breite, d. h. nach dem Abstand von der Rippe, endlich nach der Lage des Schnittes im Balken.

Die Verteilung nach der Höhe ist durch experimentelle Ermittlung der Lage der neutralen Axe erforscht und als bekannt anzunehmen; die Verteilung nach der Lage des Schnittes hängt vom Biegemomente ab, ist somit bekannt; nach der Breite zu hingegen sind die bisherigen Versuche nicht geeignet, ein zutreffendes Bild der Spannungsverteilung zu geben. Wenn man in Betracht zieht, dass die Zunahme der Druckkräfte im Obergurt längs dem Anschluss von Rippe und Hourdis eintritt und dass somit der Kraftangriff nur auf eine kleine Breite zur Wirkung kommt, so lässt sich die Verteilung in der Weise verfolgen, dass Platten gleicher Dicke und Höhe mit verschiedener Breite auf eine der Rippe eines Balkens entsprechenden schmalen Fläche an beiden Enden belastet werden.

Nach diesen Erwägungen sind in der eidg. Materialprüfungsanstalt Versuche an Betonplatten vorgenommen worden, welche hier geschildert und besprochen werden sollen.

2. Einfluss der Länge bei vertikal eingestampften Prismen aus Mörtel.

Eine erste Untersuchung wurde im Jahre 1902 nach folgendem Programme vorgenommen: Mit Bausand und Portlandcement wurden in Mischungsverhältnis 1:3 und 1:5 Prismen von 7×7 cm Querschnitt in Serien von je 6 Körpern mit einer Höhe von 3,5, 7, 10,5, 14, 21 und 28 cm erzeugt. Der Mörtel in erdfuchter Konsistenz wurde sorgfältig von Hand eingestampft und zwar vertikal in der Längsrichtung des Körpers. Damit die Variation in der Qualität des Mörtels nicht von Einfluss sei, wurden Körper verschie-

dener Höhe mit gleichzeitig angemachtem Mörtel eingestampft. Nach 28-tägiger Lagerung in feucht gehaltener Luft gelangten die Körper zur Prüfung. Es stellte sich nun heraus, dass bei längeren Prismen der Bruch in der Nähe des oberen Endes eintrat. Zur Kontrolle wurden daher ebenfalls in Mischung 1:3 und 1:5 nach zweimonatlicher Lagerung 4 Gruppen von je 3 Prismen von 7×7 cm Querschnitt und 10,5, 14, 21 und 28 cm Länge erprobt. Die Mittelwerte dieser Versuche, aus sämtlichen Körpern jeder Serie bestimmt, folgen hier nach:

Druckfestigkeiten in kg/cm² von Prismen 7×7 cm Querschnitt.

	Höhe	3,5	7	10,5	14	21	28 cm
1. Serie, Mischung 1:3		704	404	291	268	238	223 kg/cm ²
„ 1:5		310	146	93	80	72	70 „
2. Serie, „ 1:3		—	(212)	—	140	128	128 „
„ 1:3		—	(230)	165	167	136	164 „
„ 1:5		—	(133)	85	91	69	75 „
„ 1:5		—	(120)	77	72	57	67 „

Druckfestigkeiten in % der Würfelfestigkeit.

1. Serie, Mischung 1:3	174	100	72	66	59	55 %
„ 1:5	212	100	64	55	49	48 „
2. Serie, „ 1:3	—	100	—	66	60	60 „
„ 1:3	—	100	72	73	59	71 „
„ 1:5	—	100	64	68	52	56 „
„ 1:5	—	100	64	60	48	56 „
Mittel	193	100	67	64	54	58 „

Zu bemerken ist, dass der Bruch meistens durch einen schiefen Riss erfolgte; die höchsten Zahlen in den Einzelproben wurden erreicht bei Auftreten eines wenig geneigten Risses gegen das eine Ende und Bildung eines vertikalen Risses nahezu in der Axe des Prisma.

Aus den obigen Zahlen lässt sich eine gesetzmässige Verminderung der Festigkeit mit der Länge des Körpers nicht ableiten, wir wollen nur den Schluss ziehen, dass bei dieser Art der Erzeugung, wenn die Länge zweimal die Breite beträgt, die Druckfestigkeit nur zwei Drittel der Würfelfestigkeit ergibt.

3. Einfluss der Länge bei liegend eingestampften Prismen aus Beton.

Die Unterschiede in dem vertikalen Einstampfen führten behufs Erzielung einer gleichmässigen homogenen Masse dazu, die Prismen liegend zu erzeugen. Der Beton in der Mischung 300 kg Cement auf 1 m³ Kies und Sand wurde mit zürcherischem Seekies und -Sand im Verhältnis 2 Raumteile Kies : 1 Raumteil Sand angemacht und wie für Eisenbeton plastisch verarbeitet.

Die Resultate der Druckversuche einer ersten Serie sind die folgenden:

Alter der Körper 120 Tage, Querschnitt 12×12 cm.

	Höhe	12	24	36	48	60	100 cm
<i>Druckfestigkeit</i> kg/cm ²							
Mittel aus 2 Proben		305	253	241	232	245	210
Relative Festigkeit		100	83	79	76	80	69

Diese Werte sind wesentlich günstiger wie diejenigen der vorigen Untersuchung; sie lassen einen richtigen Schluss über den Betrag der Festigkeitsabnahme jedoch nicht zu.

Eine weitere Untersuchung wurde an Prismen von 8×8 cm Querschnitt, von gleicher Mischung wie die vorige, vorgenommen. Es wurden 6 Serien von Prismen aus plastisch angemachtem Beton derart liegend erzeugt, dass die 5 Körper jeder Serie aus der nämlichen Mischung erhalten wurden, um eine möglichst gleichmässige Qualität des Betons zu erreichen. Die Körper, in eisernen Formen erzeugt, wurden an der Luft bei Zimmertemperatur aufbewahrt und nach 2½ Monaten erprobt; die Auflagerflächen lagen ziemlich genau senkrecht zur Axe des Prisma.

Die erzielten Resultate sind die folgenden: Querschnitt 8×8 cm.

	Länge	8,0	8,0	36,0	72,7	109,3 cm
1. Serie, Totalbelastung		15,30	13,90	8,95	10,60	11,53 t
2. " "		14,58	15,50	13,85	11,70	10,83
3. " "		12,38	12,02	9,93	11,17	11,20
4. " "		8,73	10,62	9,15	10,08	11,18
5. " "		10,02	10,53	10,65	8,00	9,37
6. " "		12,35	11,40	8,43	8,25	10,40
Total		73,36	73,97	60,96	59,80	64,51 t
oder pro cm^2		191	192	158	156	168 kg/cm^2

Der Bruch der längeren Prismen erfolgte durch Bildung eines schiefen Risses auf eine Länge von zwei- bis dreifache Breite des Prisma. Zufälligkeiten haben auch hier eine grössere Rolle als erwartet gespielt; das Resultat für die längeren Prismen ist sehr günstig ausgefallen, wie aus den Verhältniszahlen hervorgeht:

Breite : Länge =	1	4,5	9	13,5
Druckfestigkeit				
Würfel festigkeit	100	82	81	88

Die genauen eisernen Formen und die geringe Betonmasse sicherten eine ausnahmsweise gute Zentrierung der Kraftwirkung und eine grosse Homogenität der Masse des Beton.

4. Einfluss der Breite bei Betonprismen unter zentrischer Belastung auf eine Breite gleich der Prismadicke.

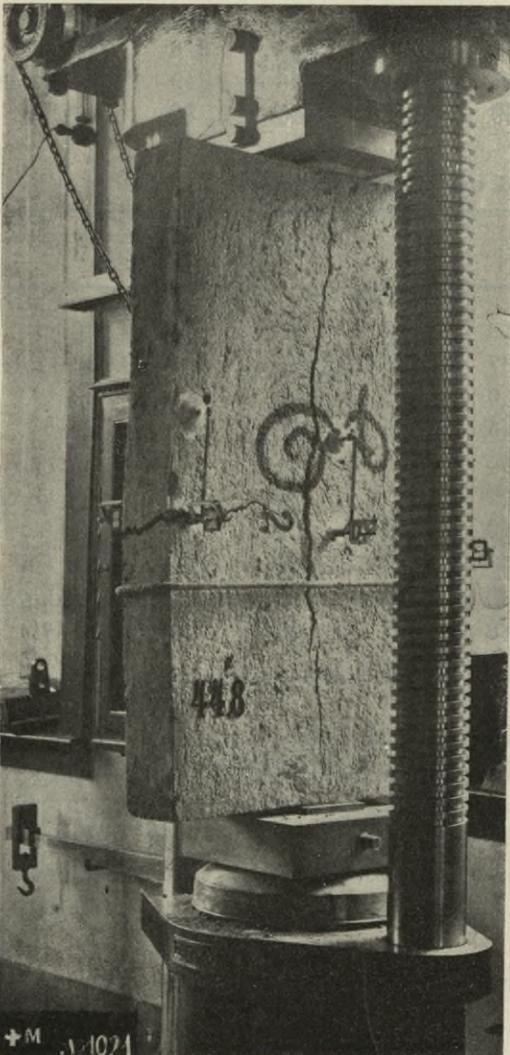


Abb. 1

Die Probekörper wurden in der Mischung 300 kg Cement auf 1 m^3 Kies und Sand (2:1) in plastischer Konsistenz und flach liegend erzeugt.

Die erste Untersuchung wurde mit *nicht armierten Körpern* durchgeführt; die erprobten Prismen haben folgende Bezeichnungen und Abmessungen:

Zahl	Bezeichnung	Dicke	Breite	Höhe in cm
2	A	12	12	100
2	B	12	24	100
2	C	12	36	100
2	D	12	48	100
2	E	12	60	100
2	1	12	12	50
2	2	12	24	50
2	3	12	36	50
2	4	12	48	50
2	5	12	60	50

Es sind zur Kontrolle der Betonfestigkeit Würfel von 12 cm Kantenlänge gleichzeitig erzeugt worden.

Die Körper wurden im Alter von ca. 3 Monaten in vertikaler Stellung auf der Amsler'schen 150 t Presse der Einwirkung einer steigenden Belastung bis zum Bruch ausgesetzt in der Weise, dass die Betonplatte durch Vermittlung einer 12 cm breiten Stahlplatte oben und unten auf $12 \times 12 \text{ cm} = 144 \text{ cm}^2$ zentrisch belastet war (siehe Abb. 1). In der Mitte der Höhe sind auf jeder Breitseite 3 Spiegelapparate angebracht worden, um in der Mitte und nahe am Rande die Längenänderungen von 15 cm langen Strecken zu beobachten. Entlastungen bis auf eine ursprüngliche Last erlaubten die bleibenden Verkürzungen zu erhalten.

Die aus den Versuchen erzielten Ergebnisse lassen sich zuerst bezüglich der Brucherscheinungen und -Belastungen besprechen, sodann bezüglich der Deformationen während dem Belasten.

5. Ergebnisse der Bruchbelastung.

Bei sämtlichen Körpern wurde die Tragfähigkeit zerstört durch Auftreten eines Längsrisses in der Mitte der Breitseiten von der Mitte der Höhe aus nach oben und unten sich erstreckend; erst hierauf trat Zerdrückung der Enden und Bildung eines Zugrisses an den Schmalseiten in der Mitte ein. Die Fig. 1 veranschaulicht die Einrichtung auf der Presse und den Bruchvorgang.

Wir lassen hier die Zusammenstellung der Würfelfestigkeits-Resultate der einzelnen Körper, der Gesamtbruchlast der Platten, der Spannung beim Bruch auf der Auflagerfläche und im mittleren Querschnitt folgen.

Körper von 1 m Länge und ca. 12 cm Dicke.

	A	B	C	D	E
Breite	12	24	36	48	60 cm
Würfelfestigkeit	305	280	240	152	234 kg/cm ²
Bruchlast der Prismen	32,7	31,5	42,0	31,0	51,8 t
	31,0	41,4	43,0	29,5	44,8 t
Auflagerfläche	151	150	148	154	149 cm ²
Spannung beim Bruch auf der Auflagerfläche, Mittel	211	243	287	196	326 kg/cm ²
In % der Würfelfestigkeit	69	87	120	129	139 %
Querschnitt in der Mitte	151	300	444	616	745 cm ²
Mittlere Spannung auf diesem Querschnitt	211	121	96	49	65 kg/cm ²
In % der Würfelfestigkeit	69	43	40	32	27 %

Körper von 0,50 m Länge und ca. 12 cm Dicke.*

	1	2	3	4	5
Breite	12	24	36	48	60 cm
Würfelfestigkeit	227	219	163	202	180 kg/cm ²
Bruchlast der Prismen	17,9	19,5	13,5	19,5	19,9 t
	16,5	16,6	13,5	20,0	18,9 t
Auflagerfläche	154	149	144	156	148 cm ²
Spannung beim Bruch auf der Auflagerfläche, Mittel	112	121	94	127	131 kg/cm ²
In % der Würfelfestigkeit	49	55	58	63	73 %
Querschnitt in der Mitte	154	298	432	624	740 cm ²
Mittlere Spannung auf diesem Querschnitt	112	60	31	32	26 kg/cm ²
In % der Würfelfestigkeit	49	27	19	16	14 %

* Bei diesem Versuche scheinen die Würfel etwas stärker eingestampft wie die Platten.

Aus diesen Resultaten geht hervor, dass die Verbreiterung eines Prismas ausserhalb der an beiden Enden direkt belasteten Fläche nur dann von günstigem Einfluss auf die Bruchspannung an der Auflagerfläche ist, wenn die Höhe des Körpers eine bessere Verteilung nach der Breite zulässt; die Prismen mit 1 m Höhe haben ein entschieden besseres Verhalten gezeigt, wie diejenigen von 50 cm Höhe, wie die Prozentwerte der Spannungen gegenüber der Würfelfestigkeit erkennen lassen. Mit 36, 48 und 60 cm Breite der Prismen trägt das 1 m lange Prisma doppelt so viel wie das 50 cm lange.

6. Versuche mit querarmierten Platten.

Die Spaltung der Platten in der Längsrichtung deutet darauf hin, dass grössere Zugspannungen quer zur Druckkraft entstehen; es war daher angezeigt, die Körper zur Aufnahme dieser Spannungen durch *Armierungseisen nach der Querrichtung* zu verstärken. Dies ist auch geschehen, indem bei zwei Serien

Probekörper von gleichen Abmessungen wie ohne Armierung, nach Abb. 2, Eisenstangen von 8 mm Durchmesser in der Mittelebene der Prismen angeordnet wurden. Der Versuch geschah in gleicher Weise, wie bei den nicht armierten Körpern. Das Verzeichnis der erprobten Prismen mit ihrer Bezeichnung ist folgendes:

Zahl	Bezeichnung	Dicke	Breite	Höhe in cm	Bemerkung
2	H	12	12	100	nicht armiert
2	J	12	36	100	armiert
2	K	12	48	100	"
2	L	12	60	100	"
2	O	12	12	50	nicht armiert
2	P	12	36	50	armiert
2	Q	12	48	50	"
2	R	12	60	50	"

Ausserdem wurden Würfel von 12 cm Kantenlänge gleichzeitig erzeugt und erprobt. Die Ergebnisse der Bruchbelastung sind in folgenden Zusammenstellungen enthalten.

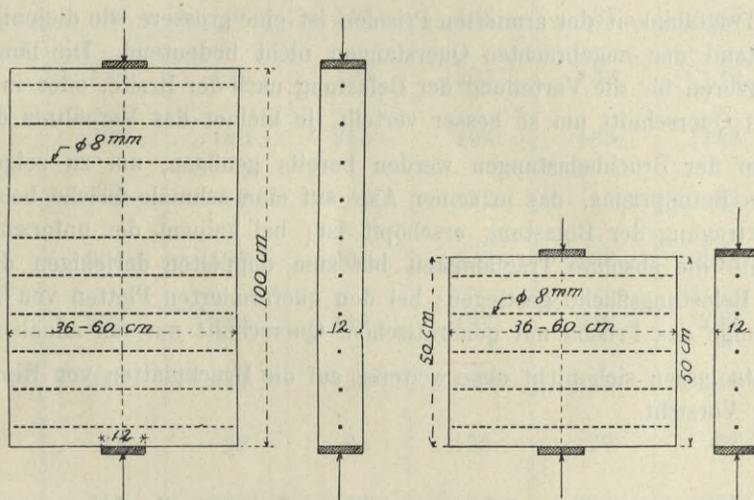


Abb. 2

Körper von 1 m Länge und ca. 12 cm Dicke.

	H	J	K	L
Breite	12	36	48	60 cm
Würfelfestigkeit, Durchschnitt	213	213	213	213 kg/cm ²
Bruchlast der Prismen	33,3	51,0	47,3	46,6 t
	30,6	49,5	48,0	51,1 t
Auflagerfläche	153	152	150	151 cm ²
Spannung beim Bruch auf der Auflagerfläche, Mittel	208	331	318	323 kg/cm ²
In % der Würfelfestigkeit	97	155	149	151 %
Querschnitt in der Mitte	153	456	600	755 cm ²
Mittlere Spannung auf diesem Querschnitt	208	110	79	65 kg/cm ²
In % der Würfelfestigkeit	97	52	37	30 %

Körper von 0,50 m Länge und ca. 12 cm Dicke.

	<i>O</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>	<i>R</i>
Breite	12	36	48	60 cm
Würfelfestigkeit, Durchschnitt	208	208	208	208 kg/cm ²
Bruchlast der Prismen	30,0	33,0	32,0	35,4 t
	28,2	(23,5)	32,0	35,1 t
Auflagerfläche	150	151	147	151 cm ²
Spannung beim Bruch auf der Auflagerfläche, Mittel	194	218	218	233 kg/cm ²
In % der Würfelfestigkeit	93	105	105	112 %
Querschnitt in der Mitte	150	453	588	755 cm ²
Mittlere Spannung auf diesem Querschnitt	194	72	54	47 kg/cm ²
In % der Würfelfestigkeit	93	35	26	22 %

Der Bruch der armierten Prismen geschah in ähnlicher Weise wie derjenige der nicht armierten, d. h. durch die Bildung eines Längsrisses in der Mitte der Breitseiten; zudem trat noch die Spaltung der Platte in der Ebene der Querarmierungen ein, als hätten die Rundeseisen bei höherer Belastung eine Keilwirkung ausgeübt. Die Tragfähigkeit der armierten Prismen ist eine grössere wie diejenige der nichtarmierten, immerhin ist der Beistand der angebrachten Querstangen nicht bedeutend. Die längeren Prismen eignen sich besser wie die kürzeren für die Verteilung der Belastung nach der Breite, oder in anderen Worten, die Belastung wird auf den Querschnitt um so besser verteilt, je kleiner das Verhältnis der Breite zur Länge.

Diese Resultate der Bruchbelastungen werden bereits genügen, um zu zeigen, wie bald bei zunehmender Breite eines Betonprisma, das in seiner Axe auf eine schmale Fläche belastet ist und aufrucht, das Material zur Uebertragung der Belastung erschöpft ist; bei keinem der untersuchten breiten Prismen ist trotz grösserer Breite die absolute Tragfähigkeit bis zum doppelten derjenigen des Prisma mit einem Querschnitt gleich der Belastungsfläche gestiegen; bei den querarmierten Platten von 1 m Länge überschritt die Tragfähigkeit diejenige des Prisma mit quadratischem Querschnitt nur um annähernd die Hälfte.

Solche Resultate lassen sich nicht ohne weiteres auf die Druckplatten von Rippenbalken übertragen, sie mahnen jedoch zur Vorsicht.

7. Resultate der Messung von Längenänderungen.

Die Belastung der einzelnen Probekörper wurde durch Beobachtung der Längenänderungen vervollständig; die Messstrecken von 15 cm Länge wurden bei Prismen von 12 × 12 cm auf zwei gegenüberliegenden Seiten in der Mitte der Höhe gewählt; bei breiteren Prismen sind 6 Strecken ebenfalls in Mitte der Höhe beobachtet worden, je 3 auf jeder Breitseite: eine in der Axe, zwei in 3 cm Abstand von der Aussenkante (siehe Abb. 1). Durch Zurückgehen auf die Anfangslast konnten die bleibenden Verkürzungen festgestellt werden.

Zur Bewertung der an breiten Prismen beobachteten Verkürzungen sollen die an Prismen quadratischen Querschnittes gemachten Ablesungen einen Anhaltspunkt geben; zu diesem Zwecke sind letztere in folgender Tabelle sowohl für die 1 m langen, wie für die 0,50 m langen Prismen mit den entsprechenden Spannungen im Beton zusammengestellt; die Beobachtungen sind hiebei nur bis zu einer Gesamtspannung von 100 kg/cm² durchgeführt worden. Die Zunahmen bei den einzelnen Laststufen sind umgekehrt proportional der für dieselben massgebenden Elastizitätskoeffizienten, wenn von den bleibenden Deformationen Umgang genommen wird.

Bei dem Versuche hat sich eine ungleiche Verteilung der Verkürzungen nach beiden Seiten des Prisma ergeben, welche zum Teil die unvermeidlichen Unterschiede in der Kompazität der Betonmasse, zum Teil die Schwierigkeit, eine genaue Zentrierung der Kraft zu erzielen infolge der Unterschiede in dem Parallelismus der Auflagerflächen, als Ursache hat. Bei allen Versuchen sind trotz der sorgfältigen Vorbereitung der Endflächen ungleiche Verkürzungen aufgetreten. Es lässt sich daher die Verkürzung zur Bestimmung der auftretenden Spannungen nur angenähert anwenden.

Elastizitätsmessungen an Prismen von 12×12 cm Querschnitt

Beton à 300 kg/m³ Kies und Sand.

Total Spannung kg/cm ²	Spannung von der ursprüngl. Belastung an gerechnet kg/cm ²	Alter der Prismen 112 Tage				Alter der Prismen 70 Tage			
		mittlere totale Verkürzungen auf 15 cm in $\frac{\text{cm}}{100,000}$				mittlere totale Verkürzungen auf 15 cm in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			
		A_1 $l=100$ cm	A_2 $l=100$ cm	δ $l=50$ cm	δ_1 $l=50$ cm	H_1 $l=100$ cm	H_2 $l=100$ cm	O_1 $l=50$ cm	O_2 $l=50$ cm
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	10	45	40	51	53	40	38	38	37
30	20	95	86	112	125	86	85	82	87
10	0	13	9	12	17	2	2	4	4
30	20	97	86	115	128	87	85	84	87
40	30	146	133	183	204	133	132	131	141
50	40	200	180	255	294	185	183	184	197
10	0	22	16	41	52	15	13	16	19
50	40	204	185	265	302	187	188	190	203
60	50	258	233	344	392	240	239	243	262
70	60	316	287	433	503	293	286	305	329
10	0	41	29	91	133	29	37	39	43
70	60	319	290	446	534	300	306	312	339
80	70	376	342	523	645	352	362	371	405
90	80	436	397	630	785	410	426	438	473
10	0	60	44	157	240	55	61	66	65
90	80	443	403	—	—	—	—	—	489
100	90	500	459	—	—	—	—	—	567
Druckfestigkeit in kg/cm ²		217	203	116	108	202	220	198	220

In nachfolgenden Tabellen sind die mittleren Verkürzungen der sechs beobachteten Strecken eines jeden Prisma zusammengestellt. Das Mittel aus zwei gegenüber liegenden Strecken gibt die Verkürzung in der Mittelebene; das Mittel aus den vier Strecken nahe dem Rande gleicht die Differenzen von einer Seite zur anderen aus.

Wird angenommen, die Verteilung nach der Breite geschehe symmetrisch von der Mitte aus nach einer Parabel, so lässt sich aus den Dehnungen in der Mitte Δl_c und am Rande Δl_r die mittlere Verkürzung eines 15 cm langen Prisma ermitteln als $\Delta l_m = \Delta l_c - \frac{\Delta l_c - \Delta l_r}{3}$.

Die Ablesungen an den Seiten sind in 3 cm Abstand vom Prismarande beobachtet worden; eine Korrektur ist daher erforderlich, um Δl_r zu erhalten. Wird nach nebenstehender Skizze (Abb. 3) die Verkürzung längs der Breite durch eine Parabel ACE dargestellt, so sind die Ordinaten Δl_c und Δl_d bekannt, Δl_r ist zu ermitteln. Wird $\Delta l_c - \Delta l_d = y_1$, $\Delta l_c - \Delta l_r = y$ gesetzt, so gibt die Gleichung der Parabel

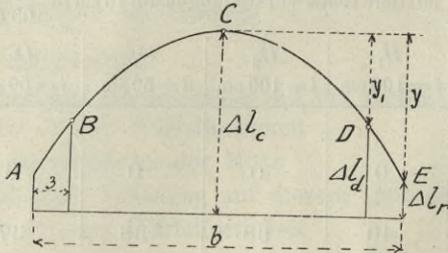


Abb. 3

$$\frac{b^2}{4} = \left(\frac{b}{2} - 3\right)^2 \frac{y}{y_1} \quad \text{und} \quad y = y_1 \cdot \frac{1}{1 - \frac{12}{b} + \frac{36}{b^2}} = \mu \cdot y_1$$

Der Coefficient μ ist für die verschiedenen Breiten der untersuchten Prismen

$b =$	24	36	48	60	cm
$\mu =$	1,779	1,439	1,306	1,235	

Die Differenzen $\Delta l_c - \Delta l_d$ sind somit mit dem Faktor μ zu multiplizieren, um den Wert y und die Längenänderung $\Delta l_r = \Delta l_c - y$ zu erhalten. Die entsprechenden Werte sind in die Tabellen eingetragen.

Wird die Längenänderung in der Mitte gleich 100 gesetzt, so lassen sich die mittleren Verkürzungen am Rande in Prozenten ermitteln; auch diese Werte sind in den Tabellen angegeben.

Bei auf Biegung beanspruchten Platten mit Rippe (Balken mit T-förmigem Querschnitt) wird die Breite der gleichmässig beanspruchten mitwirkenden Platte als Bruchteil der Stützweite oder als Bruchteil der effektiven Breite von Feldmitte zu Feldmitte empirisch angenommen. Es ist erwünscht, diese Verhältnisse durch Versuche festzustellen und die vorliegende Untersuchung soll dazu verwendet werden. Es ist daher bei jeder Platte die reduzierte Breite ermittelt worden, innerhalb welcher dieselbe Spannung wie in der Axe der Platte herrscht.

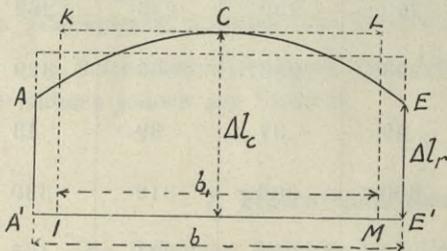


Abb. 4

Bei einer Breite b und den Dehnungen Δl_r und Δl_c am Rand und in der Mitte (Abb. 4) ist die Summe der aufgenommenen Kräfte proportional der Fläche $A'ACEE'$, d. h.

$$b \left(\Delta l_r + \frac{2}{3} \cdot (\Delta l_c - \Delta l_r) \right)$$

Die Fläche kann ersetzt werden durch ein Rechteck von der Breite b_1 und der Höhe Δl_c ; es ergibt sich die gesuchte reduzierte Breite, innerhalb welcher die ungeschmälerte Dehnung Δl_c angenommen werden kann:

$$b_1 = \frac{b}{\Delta l_c} \left(\Delta l_r + \frac{2}{3} \cdot (\Delta l_c - \Delta l_r) \right) = b \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot \frac{\Delta l_r}{\Delta l_c} \right) = \frac{b}{3} \left(2 + \frac{\Delta l_r}{\Delta l_c} \right)$$

Die Werte b_1 sind ebenfalls in die Tabellen eingetragen worden.

Bei der Berechnung der Werte Δl_r aus Δl_c und Δl_d ist zu beachten, dass eine solche nur erforderlich ist, wenn der Unterschied $\Delta l_c - \Delta l_d$ positiv ausfällt; die Beobachtungen, welche negative Differenzen ergeben, sind, wie die Tabellen zeigen, nur bei einzelnen Platten aufgetreten und haben nur untergeordnete Bedeutung bei einem Material wie Beton. In den nachfolgenden Tabellen sind die besprochenen Werte zusammengestellt.

Prismen B, Länge 101 cm, Querschnitt 12 × 24 cm, Alter 115 Tage.

Prisma B₁

Prisma B₂

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100.000}$				$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite b_1 cm	Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100.000}$			$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite b_1 cm
total t	pro cm ² kg	beobachtet		berechnet	%	beobachtet		berechnet	%			
		Δl_c	Δl_d	Δl_r		Δl_c	Δl_d	Δl_r				
1,5	5,2	0	0	= Δl_d	100	24	0	0	= Δl_d	100	24	
4,5	15,6	44	46				35	36				
7,5	25,9	92	94				79	81				
1,5	5,2	2	2				3	2				
7,5	25,9	92	94				81	81				
10,5	36,3	141	143				126	128				
13,5	46,7	195	200				173	178				
1,5	5,2	11	11				12	5				
13,5	46,7	200	204				177	185				
16,5	57,1	254	259				226	230				
19,5	67,5	314	321				280	288				
1,5	1,5	25	27				26	16				
19,5	67,5	319	327				285	289				
22,5	77,8	379	389				336	341				
25,5	88,2	449	462				399	407				
1,5	5,2	50	53				46	34				
25,5	88,2	465	472				411	416				
28,5	98,6	527	536				464	475				
31,5	109	593	605				527	539				
1,5	5,2	76	82				73	58				
31,5	109	608	619				539	548				

Prismen C, Länge 100 cm, Querschnitt 12 × 36 cm, Alter 115 Tage.

Prisma C₁

Prisma C₂

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$				$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite b_1 cm	Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite b_1 cm
total t	pro cm ² kg	beobachtet Δl_c	Δl_d	berechnet Δl_r	%	beobachtet Δl_c		Δl_d	berechnet Δl_r	%		
1,5	3,5	0	0	= Δl_d	100	36	0	0	= Δl_d	100	36	
3,75	8,7	20	19				13	18				
6,0	13,9	45	43				38	39				
8,25	19,1	68	68				59	60				
10,5	24,3	93	93				82	82				
12,25	28,3	114	115				99*	105*				
12,75*	29,6*											
15,0	34,8	144	146				128	129				
17,25	40,0	170	173				152	152				
19,5	45,2	194	200				176	176				
1,5	3,5	20	21				17	14				
19,5	45,2	197	202				178	180				
21,75	50,4	226	234				203	205				
24,0	55,6	252	260				228	231				
26,25	60,8	285	290				246	249				
28,5	66,0	305	317				280	285				
1,5	3,5	38	39				35	42				
28,5	66,0	313	322				284	291				
33,0	76,4	362	381				333	343				
37,5	86,7	422	442				386	399				
1,5	3,5	61	61				52	60				
37,5	86,7	430	451				392	409				
42,0	97,2	478	519				440	467				

Prismen 2, Länge 50 cm, Querschnitt 12,4 × 24 cm, Alter 113 Tage.

Prisma 2₁

Prisma 2₂

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$				$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Reduzierte Breite b_1 cm	Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Reduzierte Breite b_1 cm
total t	pro cm ² kg	beobachtet		berechnet	%	beobachtet		berechnet	%			
		Δl_c	Δl_d	Δl_r		Δl_c	Δl_d	Δl_r				
1,5	5,0	0	0	0		0	0	0				
3,5	11,7	40	33	28	70	21,6	12	11	= Δl_d	100	24	
5,5	18,4	85	73	64	75	22,0	52	50	48	92	23,3	
7,5	25,2	132	113	98	74	21,9	93	92	91	98	23,9	
1,5	5,0	10	14	17			4	8	11			
7,5	25,2	138	120	106	77	22,1	95	95	95	100	24,0	
9,5	31,8	189	166	148	78	22,2	140	138	136	97	23,7	
11,5	38,5	244	218	198	81	22,5	188	187	186	99	23,9	
13,5	45,2	306	275	251	82	22,6	240	242	245	102		
1,5	5,0	42	54	63			22	35	45			
13,5	45,2	317	287	264	84	22,7	244	252	258	106		
15,5	51,9	376	345	321	93	23,5	300	309	316	105		
17,5	58,6	454	426	404	95	23,6						

Prismen 3, Länge 50 cm, Querschnitt 12 × 36 cm, Alter 113 Tage.

Prisma 3₁

Prisma 3₂

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$				$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Reduzierte Breite b_1 cm	Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Reduzierte Breite b_1 cm
total t	pro cm ² kg	beobachtet		berechnet	%	beobachtet		berechnet	%			
		Δl_c	Δl_d	Δl_r		Δl_c	Δl_d	Δl_r				
1,5	3,5	0	0	0		0	0	0				
3,5	8,1	40	17	7	17,5	26,1	37	16	7	18,9	26,3	
5,5	11,7	88	37	11	12,5	25,5	82	36	16	19,5	26,4	
7,5	17,3	144	60	23	16,0	25,9	124	56	26	21,0	26,6	
9,5	22,0	206	85	32	15,6	25,8	180	75	29	16,1	26,0	
1,5	3,5	31	9									
9,5	22,0	212	86	30	14,2	26,1						
11,5	26,6	276	111	39	14,2	26,1	245	101	28	11,4	25,3	
13,5	31,2						314	127	44	14,0	25,7	
1,5	3,5						55	25	12			

Prismen 4, Länge 50 cm, Querschnitt 13 × 48 cm, Alter 118 Tage.

Prisma 4₁

Prisma 4₂

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$				$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$ %	Redu- zierte Breite b_1 cm	Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$ %	Redu- zierte Breite b_1 cm
total t	pro cm ² kg	beobachtet		berechnet	beobachtet			berechnet				
		Δl_c	Δl_d	Δl_r		Δl_c	Δl_d	Δl_r				
1,5	2,4	0	0	0		0	0	0				
3,5	5,6	34	4	— 5	—14,7	29,7	31	2	— 7	—22,5	28,3	
5,5	8,8	68	8	—10	—14,7	29,7	67	6	—13	—19,4	29,1	
7,5	12,0	106	11	—18	—17,0	29,3	107	9	—21	—19,6	28,8	
1,5	2,4	10	1	— 4	—40,0		11	0	— 3	—27,0		
7,5	12,0	108	11	—19	—17,6	29,2	109	9	—22	—20,2	27,7	
9,5	15,2	147	14	—27	—18,4	29,1	147	11	—31	—21,1	28,8	
11,5	18,4	192	18	—36	—18,8	29,0	192	15	—40	—20,8	28,7	
13,5	21,6	237	22	—45	—19,0	29,0	238	18	—50	—20,9	28,7	
1,5	2,4	32	0	—10	—31,0		32	0	—10	—31,0		
13,5	21,6	243	22	—46	—18,9	29,0	245	19	—51	—20,8	28,7	
15,5	24,8	290	25	—57	—19,7	28,8	290	22	—61	—21,0	28,7	
17,5	28,0	347	28	—70	—20,2	28,8	350					

Prismen 5, Länge 50 cm, Querschnitt 12,3 × 60 cm, Alter 118 Tage.

Prisma 5₁

Prisma 5₂

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$				$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$ %	Redu- zierte Breite b^1 cm	Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$ %	Redu- zierte Breite b^1 cm
		beobachtet		berechnet	beobachtet			berechnet				
total t	pro cm ² kg	Δl_c	Δl_d		Δl_r				Δl_c	Δl_d	Δl_r	
1,5	2,0	0	0	0			0	0	0			
3,5	4,7	30	— 1	— 8	—26,7	34,6	35	— 1	—10	—28,6	34,3	
5,5	7,4	68	— 2	—17	—25,0	35,0	74	— 2	—20	—27,1	34,6	
7,5	10,2	110	— 3	—30	—27,3	35,5	116	— 5	—34	—29,3	34,1	
1,5	2,0	8	0	— 2	—25,0	35,0	18	— 3	— 8			
7,5	10,2	112	— 4	—31	—27,7	34,5	124	— 6	—37	—29,8	34,0	
9,5	12,9	152	— 7	—45	—29,7	34,1	163	— 8	—49	—30,1	34,0	
11,5	15,6	197	—12	—61	—31,0	33,8	207	—10	—55	—26,6	34,7	
13,5	18,3	246	—12	—74	—30,1	33,8	260	—13	—78	—30,0	34,0	
1,5	2,0	28	— 2	— 9			36	— 6	—16			
13,5	18,3	248	—12	—74	—29,7	34,0	265	—14	—81	—30,7	33,9	
15,5	21,0	298	—16	—90	—30,2	33,0	318	—17	—96	—30,2	34,0	
17,5	23,7	353	—19	—107	—30,2	33,0	384	—22	—123	—32,0	33,6	
19,5	26,4	686	—76	—253	—37,0	32,6						

Prismen J, Länge 100 cm, Querschnitt 12,7 × 36 cm, Alter 67 Tage.

Armirt

Prisma J₁

Prisma J₂

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$				$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite <i>b'</i> cm	Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite <i>b'</i> cm
total t	pro cm ² kg	beobachtet Δl_c	Δl_d	berechnet Δl_r	%	beobachtet Δl_c		Δl_d	berechnet Δl_r	%		
1,5	3,3	0	0	0		0	0	0		36		
4,5	9,8	24	24	24	100	36,0	29	33	35	121		
7,5	16,4	52	50	49	94	35,3	58	66	69	119		
1,5	3,3	5	4	4	80		7	5	4			
7,5	16,4	53	51	50	94	35,3	60	67	70	117		
10,5	22,9	88	81	78	89	34,7	89	100	105	117		
13,5	29,4	116	110	107	92	35,0	119	135	142	119		
1,5	3,3	9	12	13			13	9	19			
13,5	29,4	116	112	110	95	35,4	120	135	142	118		
16,5	36,0	150	142	139	93	35,2	153	169	176	115		
19,5	42,6	187	177	173	93	35,2	192	211	219	114		
1,5	3,3	17	20	21			25	16	12			
19,5	42,6	188	179	175	93	35,2	195	215	224	115		
22,5	49,2	227	215	210	93	35,2	232	256	267	115		
25,5	55,7	265	251	245	93	35,2	274	301	313	114		
1,5	3,3	29	32	25			48	34	28			
25,5	55,7	266	254	249	94	35,3	276	303	315	114		
28,5	62,2	305	290	283	93	35,2	313	340	352	112		
31,5	68,7	38	41	42			55	36	28			

Prismen K, Länge 100 cm, Querschnitt 12,5 × 48 cm, Alter 70 Tage.

Prisma K₁

Prisma K₂

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$				$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite b_1	Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite b_1
total t	pro cm ² kg	beobachtet		berechnet	beobachtet				berechnet			
		Δl_c	Δl_d	Δl_r	%	cm	Δl_c	Δl_d	Δl_r	%	cm	
1,5	2,5	0	0	0			0	0	0			
3,5	5,8	19	16	15	79	44,8	11	11	11	100	48,0	
5,5	9,2	40	35	33	85	45,7	25	26	26	100		
7,5	12,5	59	54	53	90	46,5	40	40	40	100		
9,5	15,8	75	71	70	93	47,0	55	55	55	100		
11,5	19,2	96	89	87	90	46,5	70	70	70	100		
13,5	22,5	114	107	105	92	46,7	85	87	87	100		
1,5	2,5	4	6	7			3	4				
13,5	22,5	116	106	103	89	46,4	86	87	87	100		
15,5	25,8	135	125	122	90	46,5	101	104	105	104		
17,5	29,2	155	143	139	90	46,5	117	122	124	106		
19,5	32,5	175	162	158	90	46,5	135	140	142	105		
21,5	35,8	196	181	176	90	46,5	152	160	162	107		
23,5	39,2	216	199	194	90	46,5	171	180	183	107		
25,5	42,5	237	220	215	90	46,5	189	200	203	107		
1,5	2,5	25	23	22			12	13	13			
25,5	42,5	237	224	220	93	47,0	200	210	213	107		
27,5	45,8	261	245	240	92	46,7	215	232	237	110		
29,5	49,2	282	262	256	91	46,6	235	252	257	109		
31,5	52,5	302	285	280	92	46,7	255	273	278	109		
33,5	55,8	324	313	310	96	46,6	277	302	310	112		
35,5	59,2	345	336	333	97	46,7	288	337	352	122		
37,5	62,6	370	361	358	97	46,7	306	378	400	131		
1,5	2,5	48	58	61			36	68	78			
37,5	62,6	368	382	386	104	48,7	318	399	424	133		
39,5	65,9	376	422	436	116	50,5	352	407	427	121		

Prismen L, Länge 100 cm, Querschnitt 12,5 × 60 cm, Alter 69 Tage.

Prisma L₁

Prisma L₂

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$				$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite b_1 cm	Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite b_1 cm
total t	pro cm ² kg	beobachtet		berechnet	%	beobachtet		berechnet	%			
		Δl_c	Δl_d	Δl_r		Δl_c	Δl_d	Δl_r				
1,5	2,0	0	0	0		0	0	0				
3,5	4,7	15	9	8	53	50,6	17	9	7	41	48,2	
5,5	7,3	32	19	16	50	50,0	33	23	21	64	52,8	
7,5	10,0	46	29	25	54	50,8	49	35	32	65	53,0	
9,5	12,7	64	41	36	56	51,2	66	45	40	61	52,2	
11,5	15,3	82	52	45	55	51,0	82	56	50	61	52,2	
13,5	18,0	98	62	53	54	50,8	99	67	59	60	52,0	
1,5	2,0	6	0	-1			10	7	6			
13,5	18,0	100	64	55	55	51,0	99	68	61	62	52,4	
15,5	20,7	117	75	65	55	51,0	114	78	69	61	52,2	
17,5	23,3	135	86	74	55	51,0	131	89	79	60	52,0	
19,5	26,0	153	99	86	56	51,2	148	101	90	61	52,2	
21,5	28,7	171	113	99	58	51,6	161	112	100	62	52,4	
23,5	31,3	191	125	109	57	51,4	184	124	110	60	52,0	
25,5	34,0	209	138	121	58	51,6	200	135	120	60	52,0	
1,5	2,0	20	9	6	30		15	15	15			
25,5	34,0	211	140	123	58	51,6	201	137	122	61	52,2	
27,5	36,7	228	152	134	58	51,6	217	149	133	61	52,2	
29,5	39,3	249	168	149	60	52,0	240	166	148	62	52,4	
31,5	42,0	266	181	161	60	52,0	254	178	160	63	52,6	
33,5	44,7	288	197	175	61	52,2	272	191	172	63	52,6	
35,5	47,3	304	209	186	61	52,2	292	205	184	63	52,6	
37,5	50,0	322	225	202	62	52,4	307	218	197	64	52,8	
1,5	2,0	35	28	26			40	28	25			

Prismen P, Länge 50 cm, Querschnitt 12,5 × 36 cm, Alter 68 Tage.

Prisma P₁

Prisma P₂

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$				Δl_r	Redu- zierte Breite b_1 cm	Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			Δl_r	Redu- zierte Breite b_1 cm
total t	pro cm ² kg	beobachtet		berechnet	Δl_c	Δl_c		beobachtet		berechnet	Δl_c	
		Δl_c	Δl_d	Δl_r	%			Δl_c	Δl_d	Δl_r	%	
1,5	3,3	0	0	0			0	0	0			
3,5	7,8	33	16	9	27	27,2	24	9	2	8	25,0	
5,5	12,2	66	32	17	26	27,1	53	20	6	11	25,3	
7,5	16,7	102	49	26	25	30,0	85	32	9	11	25,3	
1,5	3,3	10	7	6	60		8	2	1	12	25,5	
7,5	16,7	103	51	28	28	27,5	89	32	7	8	25,0	
9,5	21,2	136	61	28	21	26,5	122	51	20	16	25,8	
11,5	25,6	170	83	45	26	27,1	158	68	28	18	26,2	
13,5	30,0	205	100	53	26	27,1	198	85	35	18	26,2	
1,5	3,3	27	14	8	30		22	9	3	14	25,7	
13,5	30,0	208	104	58	28	27,5	201	88	38	19	26,3	
15,5	34,5	242	121	68	28	27,5	238	105	46	19	26,3	
17,5	39,0	279	137	75	27	27,2	278	122	53	19	26,3	
19,5	43,4	321	157	84	26	27,1	322	142	62	19	26,3	
1,5	3,3	45	24	15	33		36	18	10	28		
19,5	43,4	327	161	89	27	27,2	320	145	70	22	26,4	
21,5	47,8	370	180	97	26	27,1	374	163	72	19	26,3	
23,5	52,3	765	49	-365	-47	19,0	777	41	-283	-36	19,7	
25,5	56,7	886	42	-324	-36	20,0	908	30	-352	-39	19,3	
1,5	3,3	238	-20	-132	-55	17,0	229	-28	-141	-61	16,7	

Prismen Q, Länge 50 cm, Querschnitt 12,2 × 48 cm, Alter 67 Tage.

Prisma Q₁

Prisma Q₂

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$				$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite b_1 cm	Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite b_1 cm
total t	pro cm ² kg	beobachtet Δl_c	Δl_d	berechnet Δl_r	%	beobachtet Δl_c		Δl_d	berechnet Δl_r	%		
1,5	2,5	0	0	0		0	0	0				
3,5	6,0	32	6	— 2	— 6	31,1	30	1	— 8	— 27	27,7	
5,5	9,4	66	11	— 6	— 9	30,7	63	3	— 15	— 24	28,2	
7,5	12,8	105	15	— 13	— 14	29,8	97	7	— 21	— 22	28,6	
1,5	2,5	6	0	— 2	— 33		5	1	— 3	— 60		
7,5	12,8	108	16	— 12	— 12	30,1	97	7	— 21	— 22	28,6	
9,5	16,2	144	20	— 18	— 12	30,1	135	10	— 29	— 21	28,7	
11,5	19,6	185	27	— 32	— 17	29,3	171	12	— 37	— 22	28,6	
13,5	23,0	228	32	— 29	— 13	30,0	213	19	— 40	— 19	29,0	
1,5	2,5	22	4	— 1	— 5		16	0	— 5	— 31		
13,5	23,0	232	35	— 35	— 15	29,7	218	20	— 40	— 18	29,2	
15,5	26,4	278	39	— 34	— 12	30,1	259	25	— 47	— 18	29,2	
17,5	29,8	340	44	— 47	— 14	29,8	311	29	— 58	— 19	29,0	
19,5	33,2	392	46	— 60	— 15	29,7	687	— 52	— 279	— 41	25,5	
1,5	2,5	43	2	— 11	— 25		198	— 29	— 99	— 50		
19,5	33,2	212	40	— 13	— 6	31,1	708	— 52	— 285	— 40	25,7	
21,5	36,6	675	1	— 205	— 30	27,2	825	— 79	— 355	— 43	25,2	
23,5	40,0	838	— 34	— 302	— 36	26,2	962	— 83	— 203	— 21	28,7	
25,5	43,4		— 91				1101	— 101	— 339	— 31	27,1	
1,5	2,5	155	— 59				290	— 8	— 100	— 35	26,5	
25,5	43,4		— 164				1240	— 102	— 510	— 41	25,5	

Prismen R, Länge 50 cm, Querschnitt 12,5 × 60 cm, Alter 67 Tage.

Prisma R₁

Prisma R₂

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$				$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite b_1 cm	Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			$\frac{\Delta l_r}{\Delta l_c}$	Redu- zierte Breite b_1 cm
total t	pro cm ² kg	beobachtet		berechnet	%	beobachtet		berechnet	%			
		Δl_c	Δl_d	Δl_r		Δl_c	Δl_d	Δl_r				
1,5	2,0	0	0	0		0	0	0				
3,5	4,7	30	2	— 5	—17	36,6	28	0	— 7	—25	35,0	
5,5	7,3	63	3	—11	—17	36,6	44	0	—10	—23	35,4	
7,5	10,0	98	5	—19	—19	36,2	92	— 2	—24	—26	35,8	
1,5	2,0	4	— 1	— 2			2	— 1	— 2			
7,5	10,0	98	4	—18	—18	36,4	94	— 2	—25	—27	34,6	
9,5	12,7	132	4	—26	—20	36,0	125	2	—32	—26	34,8	
11,5	15,3	170	3	—30	—18	36,4	157	— 4	—42	—27	34,6	
13,5	18,0	205	2	—47	—23	35,4	192	— 6	—53	—28	34,4	
1,5	2,0	16	— 3	— 8			8	— 2	— 4			
13,5	18,0	211	2	—47	—22	35,6	197	— 6	—55	—28	34,4	
15,5	20,7	246	0	—58	—24	35,2	229	— 8	—64	—28	34,4	
17,5	23,3	286	0	—67	—24	35,2	267	—10	—75	—28	34,4	
19,5	26,0	326	— 3	—81	—25	35,0	306	—13	—89	—29	34,2	
1,5	2,0	38	— 4	—14			18	— 5	—10			
19,5	26,0	340	— 5	—87	—26	34,8	316	—15	—94	—30	34,0	
21,5	28,7	384	— 8	—101	—26	34,8	354	—29	—121	—34	33,2	
23,5	31,3	439	—20	—129	—29	34,2	553	—91	—249	—45	31,0	
25,5	34,0	490	—155	—310	—63	27,4	662	—127	—316	—48	30,4	
1,5	2,0	163	—112	—178			160	—56	—107			

Zu diesen Tabellen ist folgendes zu bemerken:

Die nicht armierten *Prismen von 100 cm Länge und 24 cm Breite* zeigen eine gleichmässige Verteilung auf die ganze Breite, ebenso die nicht armierten *Prismen von 100 cm Länge und 36 cm Breite*; die kleinen Unterschiede, welche teilweise eine grössere Verkürzung am Rande wie in der Axe andeuten, sind durch die unvermeidlichen Mängel in der Homogenität des Materials verursacht und kommen nicht in Betracht.

Die armierten *Prismen von 100 cm Länge und 36 cm Breite* haben ein etwas ungleichmässiges Verhalten gezeigt, der Durchschnitt der Resultate beider Prismen lässt jedoch auch auf eine gleichmässige Verteilung über die ganze Breite schliessen.

Prismen von 100 cm Länge und 48 cm Breite. Die reduzierte Breite, innerhalb welcher eine gleichmässige Verteilung angenommen werden darf, beträgt im Durchschnitt innerhalb einer Spannung von 32 kg/cm²:

beim nichtarmierten Prisma	D_1	44,28 cm	} im Mittel 45,68 cm oder 95,02 % der Breite oder 45,68 % der Länge oder 3,8 mal die Lastangriffbreite
" "	"	D_2 46,16 "	
" armierten	"	K_1 44,31 "	
" "	"	K_2 48,00 "	

Prismen von 100 cm Länge und 60 cm Breite. Die reduzierte Breite wie vorhin definiert beträgt innerhalb einer Spannung von 34 kg/cm²:

beim nichtarmierten Prisma	E_1	52,17 cm	} im Mittel 52,0 cm oder 86,67 % der Breite oder 52 % der Länge oder 4,33 mal die Lastangriffbreite
" "	"	E_2 52,55 "	
" armierten	"	L_1 51,01 "	
" "	"	L_2 52,28 "	

Prismen von 50 cm Länge und 24 cm Breite. Die nur mit nichtarmierten Prismen vorgenommenen Versuche geben innerhalb 38 kg/cm² Spannung:

beim Prisma	2_1	22,03 cm	} im Mittel 22,92 cm oder 95,5 % der Breite oder 45,84 % der Länge oder 1,91 mal die Lastangriffbreite
" "	"	2_2 23,80 "	

Prismen von 50 cm Länge und 36 cm Breite. Innerhalb einer Spannung von 30 kg/cm² ergibt sich als reduzierte Breite:

beim nichtarmierten Prisma	3_1	25,92 cm	} im Mittel 26,28 cm oder 73,0 % der Breite oder 52,56 % der Länge oder 2,2 mal die Lastangriffbreite
" "	"	3_2 26,05 "	
" armierten	"	P_1 27,50 "	
" "	"	P_2 25,63 "	

Prismen von 50 cm Länge und 48 cm Breite. Innerhalb einer Spannung von 30 kg/cm² ergibt sich als reduzierte Breite:

beim nichtarmierten Prisma	4_1	29,16 cm	} im Mittel 29,11 cm oder 60,65 % der Breite oder 58,22 % der Länge oder 2,42 mal die Lastangriffbreite
" "	"	4_2 28,58 "	
" armierten	"	Q_1 30,03 "	
" "	"	Q_2 28,68 "	

Prismen von 50 cm Länge und 60 cm Breite. Innerhalb einer Spannung von 26 kg/cm² ergibt sich als reduzierte Breite:

beim nichtarmierten Prisma	5_1	34,33 cm	} im Mittel 34,53 cm oder 57,55 % der Breite oder 69,06 % der Länge oder 2,87 mal die Lastangriffbreite
" "	"	5_2 34,12 "	
" armierten	"	R_1 35,87 "	
" "	"	R_2 33,82 "	

Ein wichtiges Ergebnis dieser Versuche ist, dass eine Querarmierung bezüglich der Verteilung der inneren Spannungen nach der Breite zu keinen Einfluss ausübt; die Verteilung hängt von dem Beton ab; die Armierung kann nur später vor dem Eintritt des Bruches, in unserem Falle durch Längsspaltung der Platte, eine Wirkung ausüben. Bei höheren Spannungen, welche der Bruchbelastung nahe sind, treten in der Verteilung Unregelmässigkeiten auf, welche jedoch in absoluten Zahlen nur kleineren Druckbeanspruchungen entsprechen. Es dürfte bereits aus Vorliegendem der Schluss berechtigt sein, dass breitere Platten auf Druck nur mässig beansprucht werden dürfen.

8. Weitere Versuche über den Einfluss der Breite bei Betonplatten.

Die besprochenen Versuche sind an Platten ausgeführt worden, deren Verhältnis von Breite zu Länge im Maximum $\frac{60 \text{ cm}}{50 \text{ cm}} = 1,20$ betragen hat. Wie verteilt sich eine auf Rippenbreite übertragene Last bei ungünstigeren Verhältnissen? Um diese Frage zu beantworten, sind einige weitere Versuche an Platten ausgeführt worden mit 50 cm Länge, 12 cm Dicke und einer Breite von 12, 60, 72, 84 und 96 cm. Die Mischung war dieselbe wie bei den früheren Versuchen, d. i. 300 kg Portlandcement auf 1 m³ Sand und Kies im Verhältnis 1:2; sämtliche Körper sind gleichzeitig aus einer einzigen Betonmischung erzeugt worden und zugleich auch Prismen 12.12.36, deren Festigkeit bei Anlass der Erprobung der Platten ermittelt wurde; es ergab sich nach 45 Tagen:

als Biegefestigkeit	45,5	46,8	45,4 kg/cm ²
als Druckfestigkeit	352	351	320 „ ; Mittel 341.

Die **Bruchbelastung** der Platten und Prismen von 50 cm Länge, oben und unten ruhend auf einer 12 cm breiten Fläche, geht aus nachfolgender Zusammenstellung hervor:

	Prisma Nr.	1	2	3	4	5
Höhe 50 cm, Dicke ca. 12 cm, Breite		12	60	72	84	96 cm
Würfelfestigkeit (Mittel)		341	341	341	341	341 kg/cm ²
Bruchlast der Prismen		47,2	39,5	43,5	43,5	41,5 t
Auflagerfläche		144	146	146	146	150 cm ²
Spannung beim Bruch auf der Auflagerfläche		328	271	298	298	277 kg/cm ²
In % der Würfelfestigkeit		96	79	87	87	81 %
Querschnitt in der Mitte		144	630	876	1022	1200 cm ³
Mittlere Spannung auf diesem Querschnitt		328	54,2	49,7	41,2	34,6 kg/cm ²
In % der Würfelfestigkeit		96	15,8	14,6	12,1	10,1 %

Wie bei den früheren Versuchen erfolgte der Bruch durch Auftreten eines Risses in der Mitte der Breitseiten von der Mitte der Höhe nach oben und unten sich verlängernd.

Beim Prisma von 12×12 cm Querschnitt erreichte die Bruchfestigkeit nahezu diejenige des Würfels, bei den anderen Prismen mit grösserer Breite blieb die Bruchbelastung unter der vorigen, offenbar durch das Auftreten von Zugkräften quer zur Druckrichtung.

9. Resultate der Messung von Längenänderungen.

Die Messung der Längenänderungen geschah mittelst Spiegelapparaten; beim Prisma 12×12 cm wurden die Messtrecken von 15 cm in der Mitte der Höhe an zwei gegenüberliegenden Seiten gewählt; bei den breiteren Prismen sind 8 Strecken in mittlerer Höhe beobachtet worden und zwar 5 auf einer Breitseite gleichmässig verteilt, sodass die äusseren Apparate 3 cm weit vom Rande angebracht wurden und 3 auf der gegenüberliegenden Seite: in 3 cm Abstand vom Rande, in der Axe unter dem Kraftangriff und in der Mitte dieser beiden Apparate. Die Skizze (Abb. 5) gibt diese Anordnung der Spiegelinstrumente an; Abb. 6 zeigt die Platte in der Amsler'schen Presse bei der Probe. Die Resultate der Messungen sind in nachfolgenden Tabellen eingetragen; wie bei Beton nicht anders zu erwarten, sind die elastischen Verhältnisse bei symetrisch liegenden Punkten nicht gleich ausgefallen, die möglichst centrische Belastung nach der Dicke der Platte lässt sich trotz dem Kugelgelenk der Amsler'schen Presse nicht ganz genau erzielen; wahrscheinlich ist auch die Kompazität des Beton der Platte an dem unteren und oberen Teile beim Erzeugen verschieden.

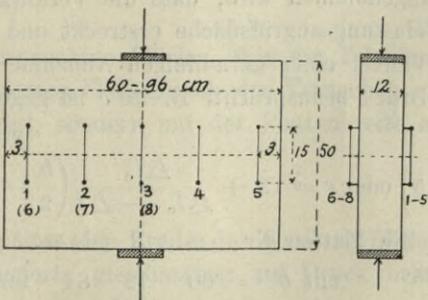


Abb. 5

Die Elastizitätsmessungen am Prisma von 50 cm Höhe, 12×12 cm Querschnitt, ergaben als mittlere Verkürzung in $\frac{\text{cm}}{100,000}$ auf 15 cm Messtrecke, von einer Anfangslast $P = 1,5^t$

und einer Anfangsspannung von 10 kg/cm² für die folgenden Spannungszunahmen:

P total in t	1,5	3,5	5,5	7,5	1,5	7,5	9,5	11,5	13,5	1,5	13,5	15,5	17,5	19,5	1,5
σ in kg/cm ²	0	13,9	27,7	41,7	0	41,7	55,4	69,5	83,1	0	83,1	97,1	111	125	0
$\Delta l =$	0	53	112	170	18	175	235	304	370	44	378	447	521	602	78

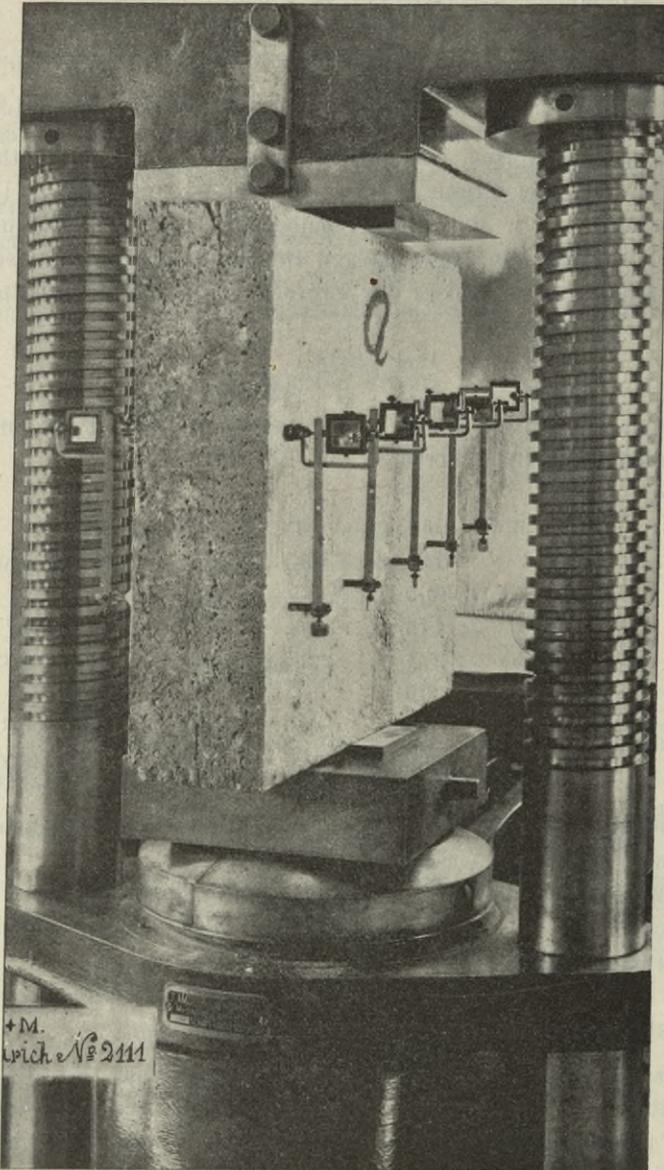


Abb. 6

Der Bruch dieses Druckkörpers erfolgte unter einer Last von 47,2^t entsprechend 328 kg/cm².

Die Platten mit 50 cm Höhe und Breiten von 60 bis 96 cm ergaben bei den Längenänderungsmessungen ein umfangreiches Zahlenmaterial, welches hier teilweise wiedergegeben wird, um die Frage der Verteilung der Spannungen nach der Breite möglichst gut aufzuklären. Zu diesem Zwecke werden hier die mittleren Verkürzungen tabellarisch zusammengestellt aus den Ablesungen an den Spiegelapparaten 1 und 6, 2 und 7, 3 und 8, d. h. nahe dem Rande, nahe dem Viertel der Breite und in der Mitte unter dem Kraftangriff.

Um festzustellen, ob mit steigender Belastung die Verteilung sich verändert, sind, ausgehend von der Verkürzung in der Mitte als Einheit = 100, auch die Veränderungen der Länge nahe dem Viertel und dem Rande als Relativzahlen in die Tabellen eingetragen worden.

Die Abb. 7 veranschaulicht die Verkürzungen in der Mitte der Breitseiten bei den Prismen Nr. 2 bis 5 bis zum Bruch. In derselben Figur sind die Verkürzungen bei Prisma 1 (12 × 12 cm) aufgetragen für Belastungen, die *doppelt so gross* sind wie die entsprechenden der breiten Prismen. Die auffallende Uebereinstimmung der 5 erhaltenen Linien gibt bereits einen wichtigen Aufschluss über das Verteilungsgesetz: *die Breite der Platten bei den gewählten Verhältnissen mit Breite: Länge $\leq 1,2$ hätte keinen Einfluss auf die Verteilungsbreite der Belastung; die reduzierte wirksame Plattenbreite würde bei gleichmässiger Beanspruchung das Doppelte der Breite der Lastangriffsfläche betragen.*

Die Breite der Platte, welche Druckspannungen aufnimmt, lässt sich annähernd aus den Verkürzungen in Plattenaxe und im Viertel der Breite ableiten, indem angenommen wird, dass die Verkürzung in der Mitte Δl_c sich auf die Belastungsangriffsfläche erstreckt und die Verkürzung Δl in der Nähe der Viertel einer geradlinigen Abnahme der Verkürzungen entspricht; die auf Druck beanspruchte Breite c ist gegeben durch die Formel (siehe Abb. 8).

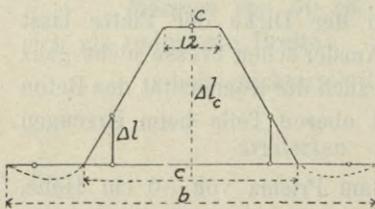


Abb. 8

$$\frac{c}{2} - 6 = \frac{\Delta l_c}{\Delta l_c - \Delta l} \cdot \left(\frac{b}{4} - 7,5 \right) \text{ oder } c = 12 + \frac{\Delta l_c}{\Delta l_c - \Delta l} \left(\frac{b}{2} - 15 \right)$$

Der Klammerausdruck beträgt für die Platten Nr. 2 3 4 5
mit $b = 60 \quad 72 \quad 84 \quad 96 \text{ cm}$
 $\frac{b}{2} - 15 = 15 \quad 21 \quad 27 \quad 33 \text{ cm}$

Die entsprechenden Werte c sind in die Tabellen eingetragen.

Die Abnahme der Δl von der Mitte aus rechts und links nach einer Parabel ergibt für die Belastungsbreite auf Druck etwas kleinere Werte wie die ermittelten; weitere Versuche wären nötig, um die Kurve der Δl festzustellen; sachlich wird am Resultat nichts geändert.

Diese Ableitung der auf Druck beanspruchten Fläche nimmt keine Rücksicht auf die an den Aussen-seiten beobachteten Zugspannungen, welche in dem Auftreten von Biegemomenten ihre Ursache haben; indem diese Momente gleichgrosse Zug- und Druckkräfte verursachen, sind letztere zu der Belastung durch die Presse zu addieren; es entsteht dann durch diesen Umstand eine grössere Breite der auf Druck

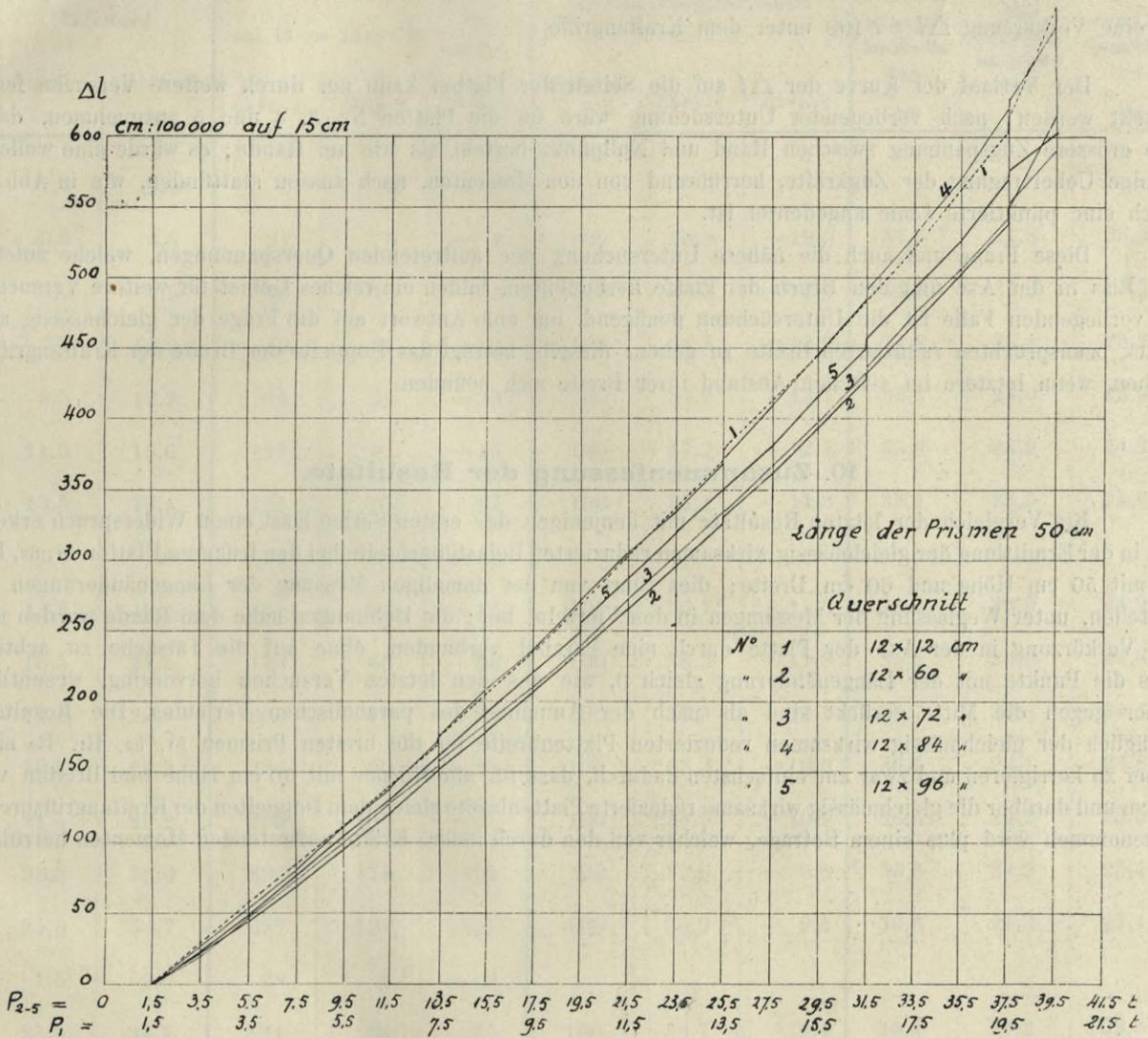


Abb. 7

beanspruchten Fläche. Wie die Tabellen zeigen, ist dies auch der Fall, indem die Breite der auf Druck wirksamen Fläche nach den Versuchen nicht genau das Doppelte der Belastungsbreite am Kraftangriffspunkt beträgt, sondern mit der Plattenbreite zunimmt, wie aus folgenden Zahlen hervorgeht:

	Platte Nr. 2	3	4	5
Breite	60	72	84	96 cm
Doppeltes der Breite der Kraftangriffsfläche	24	24	24	24 "
Reduzierte gleichmässig auf Druck beanspruchte Breite bei einer Belastung $P = 23,5^t$	24,3	27,3	29,6	30,3 "
Differenz	0,3	3,3	5,6	6,3 "
Breite der auf Zug beanspruchten Fläche	23,4	29,3	36,7	47,4 "

Ist $\Delta l_m = 100$ die Verkürzung in der Axe des Kraftangriffs, so entspricht obige Differenz in den reduzierten gleichmässig auf Druck beanspruchten Breiten einer mittleren relativen Dehnung der auf Zug beanspruchten Plattenbreite von:

in Platte	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
$\frac{0,3 \times 100}{23,4} =$	$-1,28$	$\frac{3,3 \times 100}{29,3} =$	$-11,2$	$\frac{5,6 \times 100}{36,7} =$
				$-15,3$
				$\frac{6,3 \times 100}{47,4} =$
				$-13,3$

in der Nähe des Randes betragen die relativen Dehnungen für $P = 23,5^t$

— 9,8	— 9,5	— 9,3	— 7,8
-------	-------	-------	-------

für eine Verkürzung $\Delta l = 100$ unter dem Kraftangriffe.

Der Verlauf der Kurve der Δl auf die Seiten der Platten kann nur durch weitere Versuche festgestellt werden; nach vorliegender Untersuchung wäre für die Platten Nr. 3, 4 und 5 anzunehmen, dass eine grössere Zugspannung zwischen Rand und Nullpunkt besteht als wie am Rande; es würde eine wellenförmige Uebertragung der Zugkräfte, herrührend von den Momenten, nach aussen stattfinden, wie in Abb. 8 durch eine punktierte Linie angedeutet ist.

Diese Frage und auch die nähere Untersuchung der auftretenden Querspannungen, welche zuletzt den Riss in der Axe und den Bruch der Platte herbeiführen, bilden ein reiches Gebiet für weitere Versuche. Im vorliegenden Falle ist die Untersuchung genügend, um eine Antwort auf die Frage der gleichmässig auf Druck beanspruchten reduzierten Breite zu geben: dieselbe beträgt das Doppelte der Breite der Kraftangriffsflächen, wenn letztere im 4-fachen Abstand ihrer Breite sich befinden.

10. Zusammenfassung der Resultate.

Ein Vergleich der letzten Resultate mit denjenigen der ersten Serien lässt einen Widerspruch erkennen in der Ermittlung der gleichmässig wirksamen reduzierten Belastungsbreite bei den früheren Platten 51, 52, R1, R2 mit 50 cm Höhe und 60 cm Breite; dies rührt von der damaligen Messung der Längenänderungen an 3 Stellen, unter Weglassung der Messungen in den Vierteln, her; die Dehnungen nahe dem Rande wurden mit der Verkürzung in der Axe der Platte durch eine Parabel verbunden, ohne auf die Tatsache zu achten, dass die Punkte mit der Längenänderung gleich 0, wie aus den letzten Versuchen hervorging, wesentlich näher gegen die Mitte gerückt sind als nach der Annahme des parabolischen Verlaufes. Die Resultate bezüglich der gleichmässig wirksamen reduzierten Plattenbreite für die breiten Prismen 51, 52, R1, R2 sind daher zu korrigieren und zwar am einfachsten dadurch, dass für alle Körper mit 50 cm Höhe und Breiten von 60 cm und darüber die gleichmässig wirksame reduzierte Plattenbreite gleich dem Doppelten der Kraftangriffsbreite angenommen wird plus einem Betrage, welcher von den durch innere Kräfte auftretenden Momenten herrührt.

Prisma Nr. 2, Länge 50 cm, Querschnitt 12,2 × 60 cm, Alter 46 Tage.

+ bedeutet Verkürzungen, — Dehnungen.

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100.000}$			Mittlere Verhältniszahlen zu Δl_{3-8}			Breite der auf Druck beanspruchten Fläche cm	Reduzierte Breite der auf Druck beanspruchten Fläche cm	Breite der auf Zug beanspruchten Fläche cm
total t	pro cm ² kg	Δl_{3-8}	Δl_{2-7}	Δl_{1-6}	$\frac{\Delta l_{3-8}}{=100}$	Δl_{2-7}	Δl_{1-6}			
1,5	2,0	0	0	0						
3,5	4,8	21	5	— 4	100	23,8	— 19,0	31,6	21,8	28,4
5,5	7,5	45	15	— 5	100	33,3	— 11,1	34,5	23,2	25,5
7,5	10,2	69	24	— 9	100	34,8	— 13,0	34,8	23,4	25,2
9,5	12,9	95	36	— 13	100	37,9	— 13,7	36,1	24,0	23,9
11,5	15,6	121	45	— 15	100	37,2	— 12,4	35,8	23,9	24,2
13,5	18,4	151	53	— 17	100	35,1	— 11,3	35,1	23,5	24,9
1,5	2,0	12	— 8	— 6						
13,5	18,4	151	53	— 17	100	35,1	— 11,3	35,1	23,5	24,9
15,5	21,1	178	63	— 20	100	35,3	— 11,2	35,2	23,6	24,8
17,5	23,8	206	76	— 25	100	36,9	— 12,1	35,7	23,8	24,3
19,5	26,5	236	90	— 25	100	38,2	— 10,6	36,2	24,1	23,8
21,5	29,2	265	102	— 27	100	38,5	— 10,2	36,5	24,2	23,5
23,5	32,0	296	115	— 29	100	39,0	— 9,8	36,6	24,3	23,4
25,5	34,7	327	127	— 31	100	38,9	— 9,5	36,6	24,3	23,4
1,5	2,0	28	— 6	— 9						
25,5	34,7	331	128	— 31	100	38,7	— 9,4	36,4	24,2	23,6
27,5	37,5	360	143	— 34	100	39,7	— 9,4	36,8	24,4	23,2
29,5	40,2	395	157	— 36	100	39,7	— 9,1	36,8	24,4	23,2
31,5	42,8	428	171	— 39	100	40,0	— 9,1	37,0	24,5	23,0
33,5	45,6	466	190	— 40	100	41,8	— 8,6	37,7	24,8	22,3
35,5	48,3	502	205	— 43	100	40,8	— 8,6	37,3	24,6	22,7
37,5	51,0	539	220	— 46	100	40,8	— 8,5	37,3	24,6	22,7
39,5	53,7	665	189	— 137	100	28,5	— 20,6			

Prisma Nr. 3, Länge 50 cm, Querschnitt 12,2 × 72 cm, Alter 45 Tage.

+ bedeutet Verkürzungen, — Dehnungen.

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			Mittlere Verhältniszahlen zu Δl_{3-8}			Breite der auf Druck beanspruchten Fläche cm	Reduzierte Breite der auf Druck beanspruchten Fläche cm	Breite der auf Zug beanspruchten Fläche cm
total t	pro cm ² kg	Δl_{3-8}	Δl_{2-7}	Δl_{1-6}	$\frac{\Delta l_{3-8}}{= 100}$	Δl_{2-7}	Δl_{1-6}			
1,5	1,7	0	0	0						
3,5	4,0	19	6	— 2	100	31,6	—10,5	42,7	27,3	29,3
5,5	6,3	46	12	— 5	100	26,1	—10,9	40,3	26,1	31,7
7,5	8,5	74	21	— 7	100	28,3	— 9,5	41,2	26,6	30,8
9,5	10,8	100	30	—10	100	30,0	—10,0	42,0	27,0	30,0
11,5	13,1	128	37	—11	100	28,9	— 8,6	41,7	26,8	30,3
13,5	15,4	154	48	—15	100	31,2	— 9,7	42,5	27,2	29,5
1,5	1,7	12	5							
13,5	15,4	156	49	—15	100	31,4	— 9,6	42,7	27,3	29,3
15,5	17,6	184	58	—17	100	31,5	— 9,2	42,7	27,3	29,3
17,5	19,9	210	66	—21	100	31,5	—10,0	42,7	27,3	29,3
19,5	22,2	240	76	—24	100	31,7	—10,0	42,7	27,3	29,3
21,5	24,5	272	87	—26	100	32,0	— 9,5	42,9	27,4	29,1
23,5	26,8	303	96	—29	100	31,6	— 9,5	42,7	27,3	29,3
25,5	29,1	335	105	—32	100	31,4	— 9,6	42,7	27,3	29,3
1,5	1,7	26	10	— 2						
25,5	29,1	335	105	—32	100	31,4	— 9,6	42,7	27,3	29,3
27,5	32,5	365	115	—37	100	31,5	—10,1	42,7	27,3	29,3
29,5	33,7	398	125	—40	100	31,3	—10,0	42,7	27,3	29,3
31,5	35,8	433	136	—44	100	31,3	—10,1	42,7	27,3	29,3
33,5	38,2	474	146	—48	100	30,8	—10,1	42,5	27,2	29,5
35,5	40,5	506	159	—50	100	31,5	— 9,9	42,7	27,3	29,3
37,5	42,7	543	169	—57	100	31,2	—10,5	42,5	27,2	29,5
1,5	1,7	48	15	— 7						
37,5	42,7	551	170	57	100	30,9	—10,4	42,5	27,2	29,5
39,5	45,0	590	179	63	100	30,4	—10,7	42,3	27,1	29,7
41,5	47,3	635	190	—69	100	30,0	—10,9	42,1	27,0	29,9
43,5	49,6	847	—39	—28	100	—4,6	— 3,3			

Prisma Nr. 4, Länge 50 cm, Querschnitt 12,2 × 84 cm, Alter 41 Tage.

+ bedeutet Verkürzungen, — Dehnungen.

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			Mittlere Verhältniszahlen zu Δl_{3-8}			Breite der auf Druck beanspruchten Fläche cm	Reduzierte Breite der auf Druck beanspruchten Fläche cm	Breite der auf Zug beanspruchten Fläche cm
total t	pro cm ² kg	Δl_{3-8}	Δl_{2-7}	Δl_{1-6}	$\frac{\Delta l_{3-8}}{=100}$	Δl_{2-7}	Δl_{1-6}			
1,5	1,5	0	0	0						
3,5	3,4	26	0	— 2	100	0	—7,7	39	25,5	45,0
5,5	5,4	52	12	— 5	100	23,1	—9,6	47,1	29,5	36,9
7,5	7,3	84	21	— 7	100	25,0	—8,3	47,9	29,9	36,1
9,5	9,3	112	29	—10	100	25,8	— 8,9	48,4	30,2	35,6
11,5	11,2	140	36	—14	100	25,7	—10,0	48,4	30,2	35,6
13,5	13,2	171	44	—16	100	25,7	—9,4	48,4	30,2	35,6
1,5	1,5	22	0	— 4						
13,5	13,2	174	45	—15	100	25,8	— 8,6	48,4	30,2	35,6
15,5	15,1	208	50	—19	100	24,0	— 9,1	47,6	29,8	36,4
17,5	17,1	237	57	—21	100	24,0	— 8,9	47,6	29,8	36,4
19,5	19,0	271	65	—24	100	24,0	— 8,9	47,6	29,8	36,4
21,5	20,9	305	73	—28	100	24,0	—9,2	47,6	29,8	36,4
23,5	22,8	335	80	—31	100	23,8	—9,3	47,3	29,6	36,7
25,5	24,8	369	87	—34	100	23,7	—9,2	47,3	29,6	36,7
1,5	1,5	51	1	— 7						
25,5	24,8	372	89	—33	100	23,8	—8,9	47,3	29,6	36,7
27,5	26,8	408	102	—36	100	25,0	—8,8	48,0	30,0	36,0
29,5	28,8	446	106	—38	100	23,8	—8,5	47,3	29,6	36,7
31,5	30,7	483	114	—43	100	23,6	—8,9	47,3	29,6	36,7
33,5	32,7	530	122	—47	100	22,7	— 8,7	46,8	29,4	37,2
35,5	34,6	570	130	—50	100	22,8	—8,8	47,1	29,6	36,9
37,5	36,5	620	139	—54	100	22,4	—8,7	46,8	29,4	37,2
1,5	1,5	96	7	—10						
37,5	36,5	626	138	—55	100	22,1	— 8,8	46,6	29,3	37,4
39,5	38,5	680	147	—58	100	21,7	—8,5	46,6	29,3	37,4
41,5	40,5	727	152	—64	100	20,9	—8,8	46,0	29,0	38,0

Prisma Nr. 5, Länge 50 cm, Querschnitt 12,5 × 96 cm, Alter 44 Tage.

+ bedeutet Verkürzungen, — Dehnungen.

Belastung		Mittlere Verkürzungen auf 15 cm Länge in $\frac{\text{cm}}{100,000}$			Mittlere Verhältniszahlen zu Δl_{3-8}			Breite der auf Druck beanspruchten Fläche cm	Reduzierte Breite der auf Zug beanspruchten Fläche cm	Breite der auf Zug beanspruchten Fläche cm
total t	pro cm ² kg	Δl_{3-8}	Δl_{2-7}	Δl_{1-6}	$\frac{\Delta l_{3-8}}{= 100}$	Δl_{2-7}	Δl_{1-6}			
1,5	1,2	0	0	0						
3,5	2,9	22	0	— 3	100	0	—13,6	45,0	28,5	51,0
5,5	4,6	48	3	— 5	100	6,2	—10,4	47,2	29,6	48,8
7,5	6,2	76	5	— 6	100	6,6	— 7,9	47,2	29,6	48,8
9,5	7,9	104	7	— 9	100	6,7	8,6	47,2	29,6	48,8
11,5	9,6	130	10	—14	100	7,7	—10,8	47,6	29,8	48,4
13,5	11,2	160	14	—17	100	8,7	— 10,6	48,3	30,1	47,7
1,5	1,2	18	—2	— 3						
13,5	11,2	161	15	—16	100	9,3	—10,0	48,3	30,1	47,7
15,5	12,9	192	18	—17	100	9,4	— 8,9	48,3	30,1	47,7
17,5	14,6	220	22	—20	100	10,0	— 9,1	48,6	30,3	47,4
19,5	16,2	250	24	—22	100	9,6	— 8,8	48,6	30,3	47,4
21,5	17,9	286	31	—23	100	10,8	— 8,0	49,0	30,5	47,0
23,5	19,6	319	33	—25	100	10,3	— 7,8	48,6	30,3	47,4
25,5	21,2	351	38	—26	100	10,8	— 7,7	49,0	30,5	47,0
1,5	1,2	46	3	0						
25,5	21,2	347	38	—26	100	11,0	— 7,5	49,0	30,5	47,0
27,5	22,9	380	40	—29	100	10,5	— 7,6	49,0	30,5	47,0
29,5	24,6	415	42	—33	100	10,1	— 8,0	48,6	30,3	47,4
31,5	26,2	450	48	—35	100	10,7	— 7,8	49,0	30,5	47,0
33,5	27,9	492	52	—36	100	10,6	— 7,3	49,0	30,5	47,0
35,5	29,6	526	56	—38	100	10,6	— 7,2	49,0	30,5	47,0
37,5	31,3	569	60	—39	100	10,6	— 6,9	49,0	30,5	47,0
1,5	1,2	70	4	—4						
37,5	31,3	575	61	—37	100	10,6	— 6,4	49,0	30,5	47,0
39,5	32,9	603	60	—40	100	10,0	— 6,6	48,7	30,3	47,3

Wird die gleichmässig beanspruchte reduzierte Flächenbreite sämtlicher erprobten Platten als Funktion ihrer Länge d. h. ihrer Höhe beim Versuch zusammengestellt, so ergibt dies folgendes:

Körper von 1 m Höhe							
Relative Körperhöhe:	1,00	1,00	1,00	1,00			
Relative Körperbreite:	0,24	0,36	0,48	0,60			
Reduzierte wirksame Breite:	0,24	0,36	0,457	0,52			
Körper von 0,50 m Höhe							
Relative Körperhöhe:			1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Relative Körperbreite:			0,48	0,72	0,96	1,20	1,44
Reduzierte wirksame Breite (1. und 2. Serie):			0,458	0,525	0,58	(0,69)	
" " " (3. Serie, Biegemoment berücksichtigt):						0,486	0,546
" " " (3. Serie, Biegemoment unberücksichtigt):						0,480	0,480

In Abb. 9 sind diese Werte aufgetragen; für breitere Platten gibt es zwei Linien, welche für die nachfolgende Anwendung durch die Linie mit der Ordinate $b_1 : l = 0,5$ ersetzt worden sind.

Die Abnomalie in dem Verlauf der oberen Linie ist auf die Untersuchung von Platten verschiedener Höhe bei gleichbleibender Breite des Lastangriffes zurückzuführen. Die angenommene resultierende Linie geht von 0 unter 45° bis $b_1 : l = b : l = 0,50$; von da ist die Linie horizontal, d. h. für $b : l > 0,50$ ist $b_1 : l = \text{Konstante} = 0,5$; eine solche Linie bewegt sich bis $b = 0,36$ der Plattenhöhe genau nach den

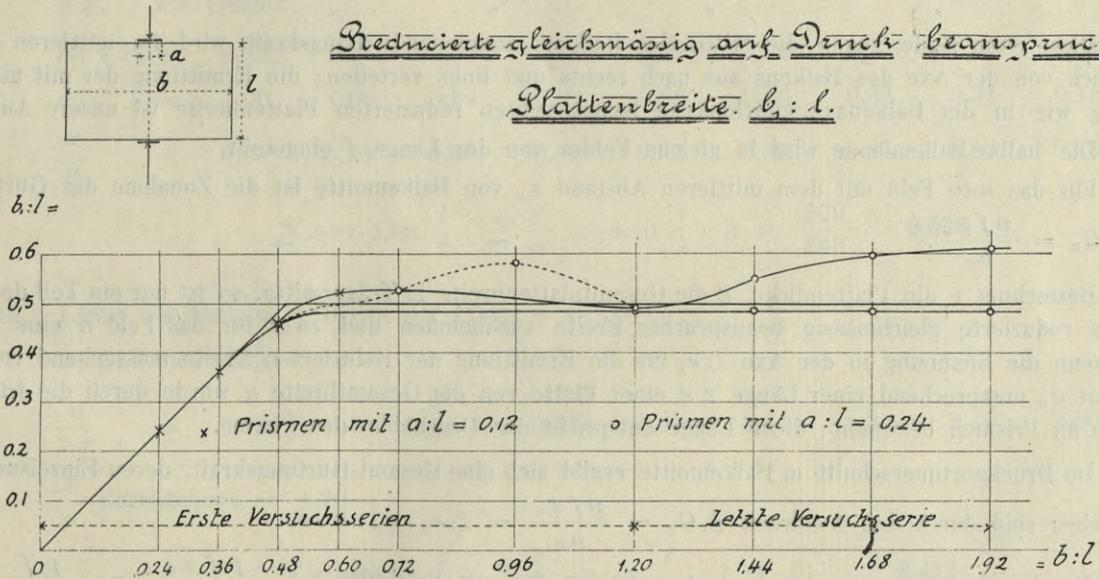


Abb. 9

Versuchen, von 0,36 bis 0,50 leicht oberhalb der den Versuchen entsprechenden Linie, sodann zwischen der Linie, die der doppelten Breite der Angriffsfläche und derjenigen, welche den ermittelten effektiven reduzierten Belastungsbreiten entspricht; die Benützung dieser angenommenen Linie wird bei dem folgenden Versuch der Ermittlung der gleichmässig wirksamen Plattenbreite bei Rippenbalken eher etwas zu kleine Werte ergeben.

Weitere Versuche im angedeuteten Sinne wären notwendig, um die hier gemachten Annahmen auf den Grad ihrer Richtigkeit zu prüfen, um ferner festzustellen, welche Teile der Platte an der Uebertragung der Druckspannungen gar nicht mitwirken, endlich um die Grösse und den Verlauf der Querdehnungen und Spannungen auf die ganze Höhe des Prisma zu verfolgen.

Wie sehr oft auf solchen Gebieten, führt die Bearbeitung der Versuchsergebnisse auf weitere Probleme, deren Lösung neue Proben und neue Anordnungen derselben erfordern.

11. Anwendung auf die Ermittlung der wirksamen Breite der Druckgurtungen bei Balken mit mittlerer Rippe (Balken mit T-förmigem Querschnitt).

An Hand der gewonnenen Versuchsergebnisse lässt sich diese Frage untersuchen; zu diesem Zwecke werden verschiedene Breiten der Platte oder Druckgurtung vorausgesetzt und die Uebertragung nach der Breite als Funktion der Trägerstützweite verfolgt.

Die Scherkräfte geben das Gesetz der Verteilung der Längskräfte zwischen Rippe und Platte an; bei freier Auflagerung und gleichmässig auf die ganze Stützweite verteilter Belastung p/m^1 sind die Scherkräfte Q durch eine Gerade dargestellt; im Abstand x von der Balkenmitte ist die Scherkraft $Q = px$; die Scherspannung beim Uebergang von Rippe in Platte $\tau = \frac{Q}{b h_s}$

wo b die Rippenbreite,

$h_s = \frac{J}{S} =$ Trägheitsmoment des ganzen Querschnittes für die neutrale Axe dividiert durch das statische Moment der Druckplatte in Bezug auf die neutrale Axe; h_s kann für die ganze Trägerlänge als konstant vorausgesetzt werden.

Auf die Länge dx wird die Gurtungskraft $\Delta G = \frac{Q dx}{h_s}$ übertragen; die Gesamtgurtungskraft, die von einem Ende bis zum Querschnitt in der Mitte übertragen wird, ist

$$G = \frac{1}{h_s} \int_0^{\frac{l}{2}} Q dx = \frac{1}{h_s} \int_0^{\frac{l}{2}} px dx = \frac{pl^2}{8 h_s}$$

Diese vom Ende gegen die Mitte des Balkens zunehmende Längskraft wird im mittleren Querschnitt sich von der Axe des Balkens aus nach rechts und links verteilen; die Ermittlung der mit gleicher Spannung wie in der Balkenaxe gleichmässig beanspruchten reduzierten Plattenbreite ist unsere Aufgabe.

Die halbe Balkenlänge wird in gleiche Felder von der Länge f eingeteilt.

Für das n -te Feld mit dem mittleren Abstand x_n von Balkenmitte ist die Zunahme der Gurtungskraft $\Delta G_n = \frac{p f x_n}{h_s}$.

Bezeichnet e die Plattendicke, a die Gesamtplattenbreite in Trägermitte, so ist nur ein Teil der letzteren als reduzierte gleichmässig beanspruchte Breite anzunehmen und zwar für das Feld n eine Breite $\alpha_n \cdot a$, wenn die Spannung in der Axe $\Delta \sigma_n$ für die Ermittlung der reduzierten Breite massgebend ist; der Coefficient α_n entsprechend einer Länge $2x$ einer Platte von der Gesamtbreite a wurde durch die früheren Versuche an Prismen bestimmt; diese Länge entspricht der Druckhöhe des Prisma.

Im Druckgurtquerschnitt in Balkenmitte ergibt sich eine Gesamt-Gurtungskraft, deren Einzelsummanden gegeben sind durch den Ausdruck $\Delta G_n = \frac{p f x_n}{h_s} = \Delta \sigma_n \cdot \alpha_n \cdot a \cdot e$.

Die Druckspannung in der Axe ist somit für das n te Feld $\Delta \sigma_n = \frac{p f x_n}{h_s \cdot \alpha_n a \cdot e} = \frac{p f}{h_s a \cdot e} \cdot \frac{x_n}{\alpha_n}$ und die Gesamtdruckspannung in Trägeraxe und Mitte $\sigma_m = \frac{p f}{h_s a e} \cdot \sum_1^n \frac{x_n}{\alpha_n}$

Wird die resultierende gleichmässig beanspruchte reduzierte Plattenbreite in Balkenmitte mit $\beta \cdot a$ bezeichnet, so besteht die Gleichung

$$\beta a e \cdot \sigma_m = G = \sum_1^n \frac{p f x_n}{h_s} = \frac{p f}{h_s} \sum_1^n x_n = \beta \cdot \frac{p f}{h_s} \cdot \sum_1^n \frac{x_n}{\alpha_n};$$

$$\text{es folgt daraus: } \beta = \frac{\sum_1^n x_n}{\sum_1^n \frac{x_n}{\alpha_n}}$$

Es kann der vorliegenden Entwicklung entgegengehalten werden, dass die Druckplatte nicht auf ihrer ganzen Dicke e dieselbe Spannung σ_m erfährt; diesem Umstand könnte Rechnung getragen werden durch Einführung eines Faktors, der im Zähler und Nenner von β erscheinen würde und daher unberücksichtigt bleiben kann.

Diese Formel wird auf Plattenbreiten a angewendet, welche 0,1 bis 1,0 der Stützweite l betragen; wird die halbe Stützweite in 10 Felder eingeteilt, so beträgt $\sum_1^n x_n = 2,5 l$.

Bei der Anwendung der Resultate aus der Abb. 9 betreffend wirksame Plattenbreite kommt an Stelle der Prismenhöhe die Länge $2 x_n$ für das n -te Feld.

Am deutlichsten geht die Ermittlung des Coeffizienten β aus der ausführlichen Berechnung einiger Beispiele hervor:

1. Fall. Länge des Balkens l , Breite der Platte $a = 0,2 l$.

$2 x_n : l =$	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	0,05
$a : 2 x_n =$	0,211	0,236	0,267	0,307	0,364	0,445	0,573	0,80	1,33	4,00
Coeffizient α	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,87	0,62	0,38	0,12
$\frac{x}{a} =$	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,40	0,40	0,40	0,40

$$\sum x = 5,00 \frac{l}{2}; \sum \frac{x}{a} = 5,80 \frac{l}{2}; \beta = \frac{500}{580} = \mathbf{0,863}$$

2. Fall. Länge des Balkens l , Breite der Platte $a = 0,4 l$.

$2 x_n : l$ wie vorhin.

$a : 2 x_n =$	0,422	0,472	0,534	0,616	0,728	0,890	1,146	1,60	2,67	8,00
$\alpha =$	1,00	1,00	0,94	0,81	0,69	0,56	0,34	0,31	0,19	0,06
$\frac{x}{a} =$	0,95	0,85	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

$$\sum x = 5,00 \frac{l}{2}; \sum \frac{x}{a} = 8,40 \frac{l}{2}; \beta = \frac{500}{840} = \mathbf{0,596}$$

3. Fall. Länge des Balkens l , Breite der Platte $a = 0,6 l$.

$2 x_n : l$ wie vorhin.

$\frac{a}{2 x} =$	0,633	0,707	0,800	0,923	1,09	1,34	1,72	2,40	4,00	12,00
$\frac{x}{a}$ durchgehend	= 1,20.									

$$\sum x = 5,00 \frac{l}{2}; \sum \frac{x}{a} = 12 \frac{l}{2}; \beta = \frac{500}{1200} = \mathbf{0,417}$$

4. Fall. Länge des Balkens l , Breite der Platte $a = 0,8 l$.

$2 x : l$ wie vorhin; $\frac{x}{a} =$ durchgehend 1,60.

$$\sum x = 5,00 \frac{l}{2}; \sum \frac{x}{a} = 16 \frac{l}{2}; \beta = \frac{500}{1600} = \mathbf{0,312}$$

5. Fall. Länge des Balkens l , Breite der Platte $a = 1,0 l$.

$2 x : l$ wie vorhin; $\frac{x}{a}$ durchgehend = 2,00.

$$\sum x = 5,00 \frac{l}{2}; \sum \frac{x}{a} = 20 \frac{l}{2}; \beta = \frac{500}{2000} = \mathbf{0,250}$$

Die ermittelten reduzierten Breiten der wirksamen Hourdisplatte, ausgedrückt in Bruchteilen der Stützweite, sind somit

für eine Breite a	=	0,2 l	0,4 l	0,6 l	0,8 l	1,0 l
mit β	=	0,863	0,596	0,417	0,312	0,250
βa	=	0,1736 l	0,2384 l	0,250 l	0,250 l	0,250 l

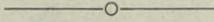
Für die Verhältnisse der Praxis darf bei *Rippenbalken als gleichmässig beanspruchte wirksame Plattenbreite höchstens ein Viertel der Stützweite in die Rechnung gesetzt werden.*

Bei dieser Ableitung sind die Resultate der Messung von Längenänderungen der Prismen verschiedener Länge und Breite allein verwertet worden. Die Resultate der Bruchbelastung solcher Prismen sind hierbei unberücksichtigt geblieben; dieselben deuten auf die Notwendigkeit hin, bei Platten von T-Balken nur sehr mässige Beanspruchungen zuzulassen, damit durch die dabei auftretenden Querspannungen eine Längsspaltung vermieden werde.

Diese Untersuchung setzt selbstverständlich voraus, dass die Plattendicke genügend stark ist, um die längs der Rippe auftretenden Scherspannungen aufzunehmen.



Resultate der Untersuchung der Längenänderungen beim Erhärten von Mörtel und Beton.



1. Einleitung.

Es ist eine bekannte Erscheinung, dass Mörtel und Beton bei Luftlagerung ein Schwinden, bei Wasserlagerung eine geringe Dehnung erfahren; können diese Aenderungen ungehindert vor sich gehen, so ist ihre Wirkung ohne Einfluss auf den inneren Spannungszustand eines Körpers; findet ein Hemmen statt, so übersetzt es sich in Spannungen, deren Bedeutung leider noch nicht oder nur in sehr unvollständiger Weise bisher verfolgt werden konnte.

Die Beobachtung von Längenänderungen bietet keine Schwierigkeit bei einer Belastungsprobe von kurzer Dauer, innerhalb welcher die feine Anordnung von Spiegelapparaten sich bewährt; ist aber an verschiedenen Körpern während längerer Zeit die Aenderung der Länge zu verfolgen und mit einer solchen Genauigkeit, dass sicher die 0,01 mm pro Meter ermittelt werden können, so gehören dazu Methoden der Messung, über welche die Prüfungsanstalten von Baumaterialien nicht verfügen und welche in physikalischen Laboratorien allein zu finden sind; für Messungen an künstlich erzeugten Körpern, deren Zusammensetzung und Eigenschaften nie scharf gekennzeichnet werden können, hat der Physiker keine Zeit. Daher sind Methoden notwendig, welche wohl nicht als vollkommen gelten können, jedoch für die Bedürfnisse des Ingenieurs hinreichende Anhaltspunkte geben.

Die in der eidg. Materialprüfungsanstalt ausgearbeitete Methode für die Messung von Längenänderungen an Prismen aus Mörtel oder Beton geht von folgenden Erwägungen aus:

Die einfachste Art der Messung hat *Bauschinger* mit seinem Tasterapparate vorgeschlagen; die dazu erforderlichen Körper sind aber nur von geringer Länge (in der Regel 10 cm) und erhalten an den Enden Körnerplatten, deren Lage sich bei längerer Aufbewahrung leicht verändert; zuverlässige Resultate erhält man auf diese Weise nicht. Die Methode von *Debray*, welche für jeden Körper einen Messapparat erfordert, dessen Stellung wie die des Körpers während der ganzen Beobachtungszeit unveränderlich sein soll, ist nicht nur kostspielig, sondern auch Störungen durch Verschiebung oder Erschütterungen unterworfen; der von *Martens* konstruierte Apparat, nach vorigem abgeleitet, bedeutet einen wesentlichen Fortschritt, verlangt jedoch ebenfalls soviel Messapparate wie Probekörper vorhanden sind.

Die zur Verwendung kommenden Prismen sollen nun Fixpunkte nahe den Enden erhalten, welche möglichst ungestört beim Handhaben der Körper bleiben und eine scharfe Einstellung ermöglichen. Diese Körper gelangen in horizontaler Lage auf eine Messbank, welche mit Mikroskop, Mikrometerschraube und -trommel versehen ist. Die erste Bedingung wurde dadurch erfüllt, dass auf die ganze Dicke des liegenden Prisma in der Nähe der Enden je ein vertikal gestelltes Glasstäbchen von 4 mm Durchmesser mit leicht hervorragendem Ende in dem Mörtel oder Beton beim Erzeugen eingeschlossen wurde. An der geschliffenen hervortretenden Oberfläche jedes Glasstäbchens wurde ein Kreuz im Voraus zur Feststellung eines Visierpunktes eingeätzt.

Die Messbank (siehe Abb. 1) wurde von der *Société pour la construction d'instruments de physique* in Genf geliefert und mit der von dieser Gesellschaft bekannten Präzision ausgeführt. Das lästige Drehen der Schraube, um nach einander beide Ende des Prisma unter dem Mikroskop zu bringen, wird dadurch vermieden, dass die Schraubenmutter aus 2 Teilen besteht, welche sich leicht von der Schraube gleichzeitig entfernen lassen, so dass der mit der Schraubenmutter verbundene und den Probekörper tragende Schlitten sich um die Entfernung der Fixpunkte mit Leichtigkeit verschieben lässt. Hierauf wird die Schraubenmutter mit der Schraube wieder in Berührung gebracht und es lässt sich die genaue Einstellung mittelst Drehen

der Mikrometerschraube erzielen. Selbstverständlich dürfen Ablesungen nur stattfinden, wenn das Mikroskop ohne Veränderung für beide Prismenenden eine scharfe Ablesung am Fadenkreuz gestattet und wenn die Drehung der Mikrometertrommel immer in gleicher Richtung erfolgt, damit das geringe Spiel zwischen Schraubengang und -mutter keine Störungen veranlasse.

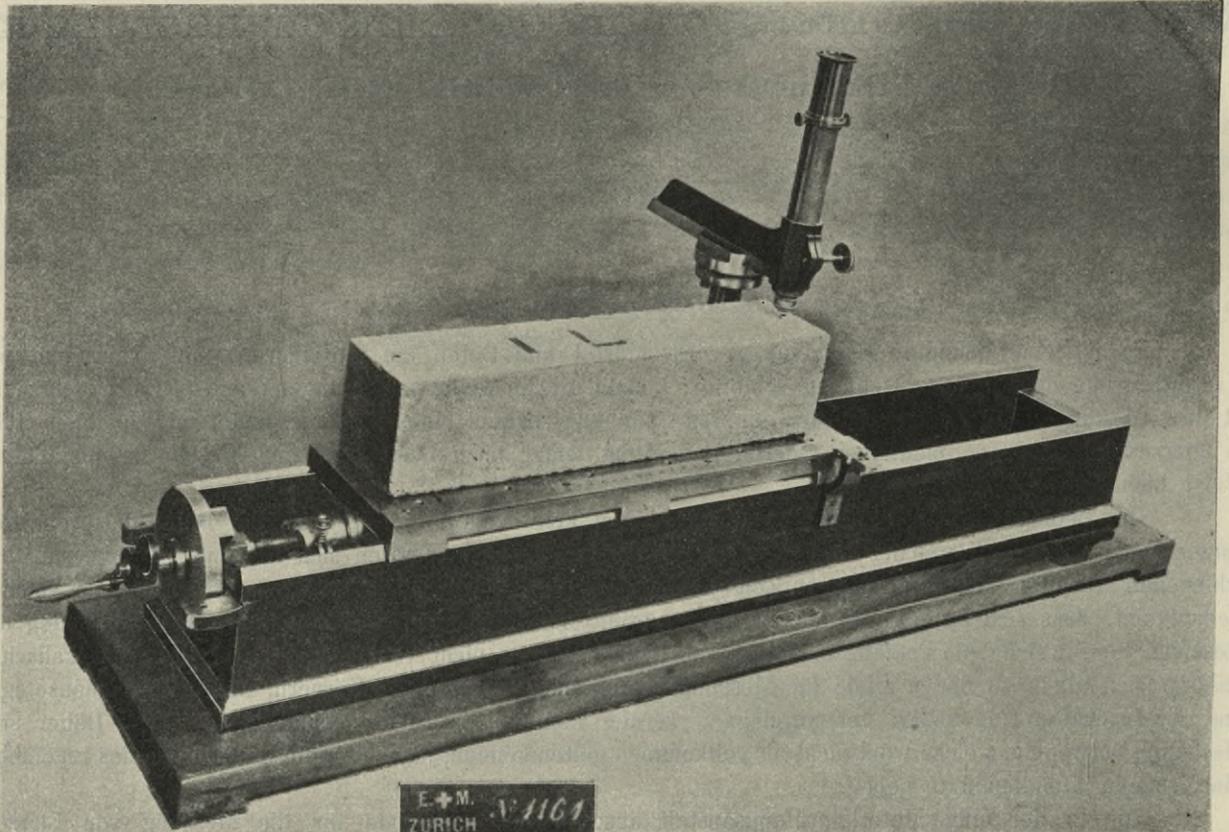


Abb. 1

Die beschriebene Vorrichtung gestattet die Ablesung der $\frac{1}{1000}$ mm an der Trommel; eine solche Genauigkeit wäre nur von Wert, wenn die Temperatureinflüsse bei Mörtel oder Beton und Metall der Schraube dieselben wären. Der Dilationscoefficient ist bei Körpern aus Beton und Eisen nur sehr wenig verschieden; wird, wie es bei unseren Messungen der Fall war, dafür gesorgt, dass die Körper vor der Messung einige Stunden im gleichen Raum wie der Apparat aufbewahrt werden, so darf diesem Umstand keine störende Wirkung beigemessen werden.

In diesem Sinne sind Versuche angestellt worden mit zwei Serien von Probekörpern:

1. Mit Prismen von $4 \times 4 \times 16$ cm aus Mörtel mit verschiedenen Bindemitteln.
2. Mit Prismen von $8 \times 8 \times 36$ cm aus Mörtel und Beton und zwei verschiedenen Portlandcementen.

2. Längenänderungen von Mörtel aus verschiedenen Bindemitteln.

Diese Untersuchung bezweckte den Einfluss der Lagerung an der Luft und unter Wasser auf die Länge von Prismen von $4 \times 4 \times 16$ cm zu ermitteln und zwar ohne Zusatz von Sand am reinen Bindemittel (1:0) und mit Zusatz von 3 Gewichtsteilen schweizerischen Normalsandes (1:3). Die Erzeugung der Prismen geschah nach dem in der eidg. Materialprüfungsanstalt ausgearbeiteten Verfahren, wobei gleichzeitig in geeigneten Formen (siehe Abb. 2) 6 Prismen erhalten werden; 3 Prismen wurden an der Luft und 3 unter Wasser bei Zimmertemperatur aufbewahrt. Die Wassermenge betrug für die Prismen 1:0 diejenige der Normalkonsistenz, für die Prismen 1:3 12—14 %, je nach dem Bindemittel, um eine der Praxis entsprechende plastische Konsistenz zu erhalten.

Die erprobten Bindemittel sind schweizerischer Herkunft und betreffen:

- Nr. 1179. Portlandcement mit hoher Festigkeit.
- Nr. 1170. Portlandcement mit mittlerer Festigkeit.
- Nr. 1178. Schlackencement mit normaler Festigkeit.
- Nr. 1175. Romancement mit denselben Eigenschaften wie der Grenoblecement.
- Nr. 1164. Hydraulischer Kalk mit relativ hoher Festigkeit.

Jedes Bindemittel wurde der üblichen 28-tägigen Normenprobe unterworfen; die Resultate derselben sind in nachstehender Tabelle zusammengestellt; diese Bindemittel waren volumenbeständig.

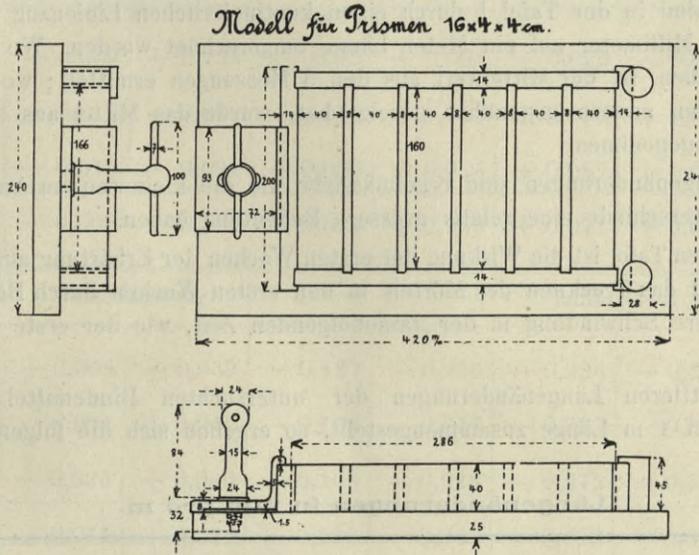


Abb. 2

Bestimmung:	Portlandcement Nr. 1179	Portlandcement Nr. 1170	Schlackencement Nr. 1178	Romancement Nr. 1175	Kalk Nr. 1161
Farbe	grau	hellgelblich-grau	weisslich-grau	grau, Stich ins Gelbe	gelb
Spezifisches Gewicht	3,19	2,98	2,75	3,11	2,77
Glühverlust	2,57	5,32	5,05	2,80	13,98 ‰
Volumengewichte: maschinell eingestäubt	1,18	0,94	1,00	0,86	0,86 kg/L
lose eingefüllt	1,44	1,20	1,11	1,15	0,95 „
maschinell eingerüttelt	1,92	1,65	1,67	1,53	1,47 „
Abbindeverhältnisse: Anmachwasser	26	30,5	31 ³ / ₄	34	32,5 ‰
Erhärtungsbeginn	5 Std. 45 Min.	4 Std.	1 Std. 10 Min.	3 ¹ / ₂ Min.	1 Std. 15 Min.
Bindezeit	18 Std.	15 Std.	13 Std.	6 Min.	16 Std.
Feinheit der Mahlung: Rückstand am					
900. Maschensieb	0,2	Spur	0,1	3,5	1,8 ‰
4900. „	17,4	3,3	15,0	22,7	—
Normenfestigkeit 1:3, Wassermenge	9 ³ / ₄	9 ³ / ₄	9 ³ / ₄	11 ¹ / ₄	11 ¹ / ₄ ‰
Zug nach 7 Tagen	22,9	17,4	18,3	14,2	5,3 kg/cm ²
„ „ 28 „	29,6	25,9	23,0	21,5	13,3 „
Druck nach 7 Tagen	213,3	155,3	142,6	119,6	37,0 „
„ „ 28 „	340,0	244,6	192,5	201,3	72,0 „

Die Messung der Längenänderungen geschah durchweg durch denselben Beobachter (Abteilungs-
vorsteher *E. Brunner*), welcher mit Sorgfalt die Eigentümlichkeiten der Fixpunkte bei den verschiedenen
Körpern notiert hatte, um eine scharfe Einstellung auch bei späteren Messungen zu ermöglichen. Die Mes-
sungen fanden statt nach einer Erhärtungsdauer von 3, 7, 28, 84, 210 Tagen, 1 Jahr, 1½ und 2 Jahren.

Die ausführlichen Resultate der Beobachtungen an den 60 Körpern sind in den folgenden Tabellen zu-
sammengestellt.

Der erste Versuch wurde mit Portlandcement Nr. 1179 ausgeführt; durch ein Versehen sind die
Körper der Mischung 1:0 nach 7 Tagen in der Lagerungsart verwechselt worden; der Versuch wurde dennoch
als Vorversuch weitergeführt und ist hier wegen der lehrreichen Störung in der Lagerung auch mitgeteilt
worden. Der günstige Einfluss der anfänglichen Wasserlagerung der hierauf trocken aufbewahrten Körper
kommt deutlich zum Ausdruck.

Die Mittelwerte sind in der Tafel I durch einen kontinuierlichen Linienzug veranschaulicht, wobei
die Längenänderungen in Millimeter auf ein Meter Länge umgerechnet wurden. Wo die drei Körper über-
einstimmende Zahlen ergaben, ist der Mittelwert aus den 3 Messungen ermittelt; wo ein Körper ein abnor-
males Verhalten den beiden andern gegenüber gezeigt hat, wurde das Mittel aus diesen beiden Beobach-
tungen als massgebend angenommen.

Die grösseren Längenänderungen sind regelmässiger wie die kleineren am Anfange der Beobachtung,
bei welchen dieselben Unterschiede eine relativ grössere Bedeutung haben.

In der vorerwähnten Tafel ist die Wirkung der ersten Wochen der Erhärtung auf die Längenänderungen
deutlich zu erkennen; wird das Trocknen des Mörtels in den ersten Wochen durch Bespritzen verhindert, so
entsteht eine weit geringere Schwindung in der darauffolgenden Zeit, wie der erste Portlandcement es klar
hervortreten lässt.

Werden die mittleren Längenänderungen der untersuchten Bindemittel nach 28 Tagen und
2 Jahren in Millimeter auf 1 m Länge zusammengestellt, so ergeben sich die folgenden Werte:

Längenänderungen in mm pro m.

		Luftlagerung			Wasserlagerung		
		28 Tage	2 Jahre	Zunahme	28 Tage	2 Jahre	Zunahme
		mm/m			mm/m		
Portlandcement	1:0 . . .	- 3,02	- 4,70	- 1,68	+ 0,53	+ 1,33	+ 0,80
„	1:3 . . .	- 1,28	- 1,76	- 0,48	+ 0,09	+ 0,21	+ 0,12
Schlackencement	1:0 . . .	- 2,72	- 4,33	- 1,61	+ 0,09	+ 0,38	+ 0,29
„	1:3 . . .	- 1,60	- 2,06	- 0,46	+ 0,05	+ 0,13	+ 0,08
Romancement	1:0 . . .	- 3,03	- 5,00	- 1,92	+ 0,38	+ 0,87	+ 0,49
„	1:3 . . .	- 0,65	- 1,17	- 0,52	+ 0,05	+ 0,11	+ 0,06
Hydraulischer Kalk	1:0 . . .	- 2,43	- 2,60	- 0,17	+ 0,04	+ 0,25	+ 0,21
„	„ 1:3 . . .	- 0,70	- 0,86	- 0,16	- 0,08	+ 0,07	+ 0,15

Die grössten Zahlen der Schwindung des reinen Bindemittels (1:0) finden sich beim Romancement
und die des Mörtels 1:3 beim Schlackencement.

Zum Vergleich dieser Werte der Längenänderungen sei daran erinnert, dass für einen linearen
Dehnungscoefficient von $\frac{1}{800}$ für 100° C, eine Temperaturdifferenz von $\pm 10^\circ$ C eine Längenänderung
von $\pm 0,125$ mm hervorruft.

Portlandcement

Nr. 1179.

Misch- ung	Wasser- menge o/o	Ursprüngliche Stablänge (nach 24-stünd. Luftlagerung) Mittel aus 2—4 Abmessungen	Aenderungen der ursprünglichen Stablänge in Millimetern nach							
			3 Tagen	7 Tagen	28 Tagen	84 Tagen	210 Tagen	1 Jahr	1 1/2 Jahren	2 Jahren
			Luftlagerung			Wasserlagerung				
1 : 0	26	mm								
		149,586	— 0,034	— 0,123	— 0,072	+ 0,008	+ 0,029	+ 0,063	+ 0,071	+ 0,103
		149,548	0,0	— 0,089	+ 0,011	+ 0,055	+ 0,098	+ 0,095	+ 0,099	+ 0,111
		149,928	+ 0,010	— 0,091	— 0,003	+ 0,055	+ 0,087	+ 0,094	+ 0,115	+ 0,126
		Mittel:	— 0,008	— 0,101	— 0,021	+ 0,039	+ 0,071	+ 0,084	+ 0,095	+ 0,113
			Wasserlagerung			Luftlagerung				
1 : 0	26	150,182	+ 0,005	+ 0,039	— 0,137	— 0,255	— 0,326	— 0,329	— 0,382	— 0,360
		150,882	+ 0,004	+ 0,042	— 0,124	— 0,247	— 0,337	— 0,343	— 0,380	— 0,373
		150,201	+ 0,025	+ 0,050	— 0,106	— 0,223	— 0,275	— 0,316	— 0,260	— 0,338
		Mittel:	+ 0,011	+ 0,044	— 0,122	— 0,242	— 0,313	— 0,329	— 0,341	— 0,357
					Luftlagerung					Wasserlagerung
1 : 3	13	149,636	— 0,049	— 0,123	— 0,175	— 0,179	— 0,220	— 0,225	— 0,227	— 0,215
		149,431	— 0,019	— 0,065	— 0,125	— 0,140	— 0,146	— 0,157	— 0,168	— 0,164
		150,106	— 0,011	— 0,043	— 0,096	— 0,109	— 0,121	— 0,139	— 0,148	— 0,158
		Mittel:	— 0,026	— 0,077	— 0,132	— 0,143	— 0,162	— 0,174	— 0,181	— 0,179
					Wasserlagerung					Luftlagerung
1 : 3	13	149,982	— 0,029	— 0,029	— 0,009	— 0,009	— 0,024	— 0,003	— 0,010	— 0,007
		149,649	— 0,002	+ 0,004	+ 0,020	+ 0,022	+ 0,013	+ 0,029	+ 0,025	+ 0,039
		149,264	+ 0,020	+ 0,022	+ 0,029	+ 0,029	+ 0,036	+ 0,035	+ 0,042	+ 0,040
		Mittel:	— 0,004	— 0,001	+ 0,013	+ 0,014	+ 0,008	+ 0,020	+ 0,019	+ 0,026
					Luftlagerung					Wasserlagerung

Portlandcement

Nr. 1170.

Misch- ung	Wasser- menge o/o	Ursprüngliche Stablänge (nach 24-stünd. Luftlagerung) Mittel aus 2—4 Abmessungen	Aenderungen der ursprünglichen Stablänge in Millimetern nach							
			3 Tagen	7 Tagen	28 Tagen	84 Tagen	210 Tagen	1 Jahr	1½ Jahren	2 Jahren
			Luftlagerung							
1 : 0	30	mm								
		149,597	— 0,016	— 0,101	— 0,464	— 0,502	— 0,699	— 0,676	— 0,742	— 0,691
		150,100	— 0,012	— 0,064	— 0,439	— 0,478	— 0,717	— 0,669	— 0,753	— 0,713
		149,591	— 0,019	— 0,094	— 0,460	— 0,514	— 0,706	— 0,698	— 0,752	— 0,713
		Mittel:	— 0,016	— 0,086	— 0,454	— 0,498	— 0,707	— 0,681	— 0,749	— 0,706
			Wasserlagerung							
1 : 0	30	151,906	+ 0,008	+ 0,013	+ 0,067	+ 0,107	+ 0,126	+ 0,151	+ 0,181	+ 0,184
		150,578	+ 0,015	+ 0,020	+ 0,078	+ 0,118	+ 0,115	+ 0,173	+ 0,203	+ 0,208
		149,534	+ 0,024	+ 0,074	+ 0,095	+ 0,123	+ 0,145	+ 0,172	+ 0,211	+ 0,208
		Mittel:	+ 0,016	+ 0,036	+ 0,080	+ 0,116	+ 0,129	+ 0,165	+ 0,198	+ 0,200
			Luftlagerung							
1 : 3	12	151,331	— 0,007	— 0,050	— 0,196	— 0,206	— 0,284	— 0,262	— 0,290	— 0,263
		149,878	+ 0,002	— 0,035	— 0,181	— 0,193	— 0,248	— 0,248	— 0,262	— 0,252
		150,088	— 0,013	— 0,098	— 0,198	— 0,211	— 0,275	— 0,249	— 0,284	— 0,280
		Mittel:	— 0,006	— 0,061	— 0,192	— 0,203	— 0,269	— 0,253	— 0,279	— 0,265
			Wasserlagerung							
1 : 3	12	150,836	+ 0,004	+ 0,023	+ 0,017	+ 0,016	+ 0,024	+ 0,015	+ 0,028	+ 0,033
		149,256	+ 0,001	+ 0,011	+ 0,005	+ 0,020	+ 0,016	+ 0,016	+ 0,033	+ 0,020
		148,175	— 0,001	+ 0,020	+ 0,019	+ 0,026	+ 0,022	+ 0,019	+ 0,048	+ 0,039
		Mittel:	+ 0,001	+ 0,018	+ 0,014	+ 0,021	+ 0,021	+ 0,017	+ 0,036	+ 0,031

Schlackencement

Nr. 1178.

Misch- ung	Wasser- menge ‰	Ursprüngliche Stablänge (nach 24-stünd. Luftlagerung) Mittel aus 2-4 Abmessungen	Aenderungen der ursprünglichen Stablänge in Millimetern nach							
			3 Tagen	7 Tagen	28 Tagen	84 Tagen	210 Tagen	1 Jahr	1 1/2 Jahren	2 Jahren
			Luftlagerung							
1 : 0	31	mm								
		150,537	+ 0,001	- 0,064	- 0,393	- 0,515	- 0,673	- 0,639	-	- 0,624
		149,362	- 0,008	- 0,079	- 0,431	- 0,490	- 0,662	- 0,630	- 0,662	- 0,629
		149,680	- 0,014	- 0,089	- 0,399	- 0,500	- 0,704	- 0,702	- 0,756	- 0,694
		Mittel:	- 0,007	- 0,077	- 0,408	- 0,502	- 0,680	- 0,657	- 0,706	- 0,649
			Wasserlagerung							
1 : 0	31	149,243	+ 0,010	+ 0,010	+ 0,017	+ 0,033	+ 0,042	+ 0,054	+ 0,068	+ 0,058
		149,490	+ 0,007	+ 0,011	+ 0,024	+ 0,039	+ 0,045	+ 0,039	+ 0,067	+ 0,070
		149,004	+ 0,002	- 0,004	- 0,002	+ 0,023	+ 0,028	+ 0,032	+ 0,049	+ 0,047
		Mittel:	+ 0,006	+ 0,006	+ 0,013	+ 0,032	+ 0,038	+ 0,042	+ 0,061	+ 0,058
			Luftlagerung							
1 : 3	12 1/2	147,356	- 0,005	- 0,067	- 0,245	- 0,243	- 0,311	- 0,312	- 0,335	- 0,316
		148,896	- 0,008	- 0,056	- 0,230	- 0,235	- 0,287	- 0,291	- 0,296	- 0,298
		148,740	- 0,014	- 0,063	- 0,245	- 0,241	- 0,302	- 0,394	- 0,313	- 0,309
		Mittel:	- 0,009	- 0,062	- 0,240	- 0,240	- 0,300	- 0,332	- 0,315	- 0,308
			Wasserlagerung							
1 : 3	12 1/2	148,568	+ 0,011	+ 0,020	+ 0,009	+ 0,019	+ 0,010	+ 0,011	+ 0,028	+ 0,025
		149,270	- 0,001	- 0,004	+ 0,001	+ 0,009	+ 0,009	+ 0,010	+ 0,008	+ 0,015
		148,367	+ 0,008	- 0,008	+ 0,010	+ 0,012	+ 0,014	+ 0,022	+ 0,028	+ 0,016
		Mittel:	+ 0,006	+ 0,003	+ 0,007	+ 0,013	+ 0,011	+ 0,014	+ 0,021	+ 0,019

Romancement

Nr. 1175.

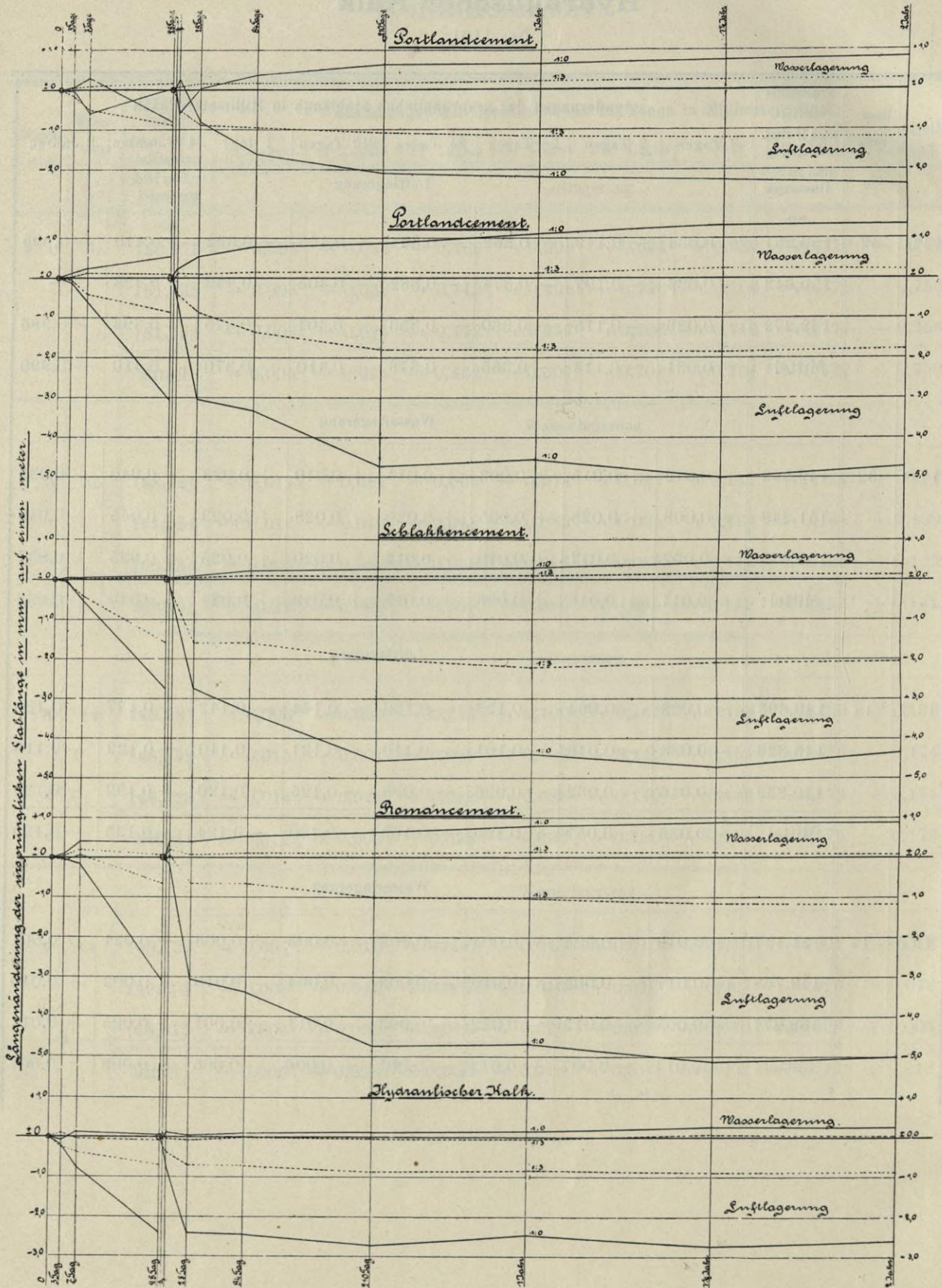
Misch- ung	Wasser- menge ‰	Ursprüngliche Stablänge (nach 24-stünd. Luftlagerung) Mittel aus 2—4 Abmessungen	Aenderungen der ursprünglichen Stablänge in Millimetern nach							
			3 Tagen	7 Tagen	28 Tagen	84 Tagen	210 Tagen	1 Jahr	1½ Jahren	2 Jahren
			Luftlagerung							
1 : 0	35	mm								
		150,975	— 0,005	— 0,026	— 0,466	— 0,508	— 0,694	— 0,689	— 0,770	— 0,739
		151,632	— 0,006	— 0,030	— 0,449	— 0,496	— 0,728	— 0,706	— 0,770	— 0,755
		151,192	— 0,003	— 0,023	— 0,472	— 0,517	— 0,706	— 0,716	— 0,777	— 0,756
		Mittel :	— 0,005	— 0,025	— 0,462	— 0,507	— 0,709	— 0,704	— 0,772	— 0,750
			Wasserlagerung							
1 : 0	35	148,524	+ 0,017	+ 0,082	+ 0,069	+ 0,074	+ 0,097	+ 0,113	+ 0,124	+ 0,122
		151,054	+ 0,016	+ 0,049	+ 0,048	+ 0,082	+ 0,099	+ 0,124	+ 0,138	+ 0,139
		150,234	+ 0,002	+ 0,050	+ 0,056	+ 0,083	+ 0,088	+ 0,119	+ 0,134	+ 0,133
		Mittel :	+ 0,012	+ 0,060	+ 0,058	+ 0,080	+ 0,095	+ 0,119	+ 0,132	+ 0,131
			Luftlagerung							
1 : 3	14	149,987	— 0,006	+ 0,005	— 0,117	— 0,100	— 0,161	— 0,166	— 0,180	— 0,179
		148,642	— 0,015	+ 0,001	— 0,089	— 0,108	— 0,140	— 0,154	— 0,176	— 0,174
		149,423	— 0,014	+ 0,022	— 0,088	— 0,088	— 0,149	— 0,146	— 0,173	— 0,174
		Mittel :	— 0,012	+ 0,009	— 0,098	— 0,099	— 0,150	— 0,155	— 0,176	— 0,176
			Wasserlagerung							
1 : 3	14	148,733	— 0,007	+ 0,016	— 0,006	+ 0,015	+ 0,013	— 0,010	+ 0,001	+ 0,018
		149,309	— 0,009	+ 0,046	+ 0,007	+ 0,010	+ 0,010	+ 0,007	+ 0,023	+ 0,016
		146,973	— 0,004	+ 0,023	+ 0,023	+ 0,029	+ 0,025	+ 0,010	+ 0,028	+ 0,003
		Mittel :	— 0,005	+ 0,028	+ 0,008	+ 0,018	+ 0,016	+ 0,002	+ 0,017	+ 0,012

Hydraulischer Kalk

Nr. 1161.

Misch- ung	Wasser- menge o/o	Ursprüngliche Stablänge (nach 24-stünd. Luftlagerung) Mittel aus 2—4 Abmessungen	Aenderungen der ursprünglichen Stablänge in Millimetern nach								
			3 Tagen	7 Tagen	28 Tagen	84 Tagen	210 Tagen	1 Jahr	1 1/2 Jahren	2 Jahren	
1 : 0	32	mm									
		150,251	— 0,034	— 0,119	— 0,362	— 0,394	— 0,423	— 0,392	— 0,413	— 0,395	
		150,643	— 0,033	— 0,107	— 0,374	— 0,382	— 0,405	— 0,343	— 0,423	—	
		149,272	— 0,026	— 0,115	— 0,360	— 0,353	— 0,401	— 0,375	— 0,394	— 0,386	
	Mittel:	— 0,031	— 0,114	— 0,365	— 0,376	— 0,410	— 0,370	— 0,410	— 0,390		
	Luftlagerung										
	Wasserlagerung										
	1 : 0	32	149,542	— 0,019	+ 0,015	+ 0,003	+ 0,014	+ 0,010	+ 0,023	+ 0,040	+ 0,033
			151,248	— 0,008	+ 0,023	+ 0,005	+ 0,020	+ 0,028	+ 0,023	+ 0,045	+ 0,043
			152,638	— 0,007	+ 0,017	+ 0,010	+ 0,012	+ 0,020	+ 0,025	+ 0,035	+ 0,037
Mittel:			— 0,011	+ 0,018	+ 0,006	+ 0,015	+ 0,019	+ 0,024	+ 0,040	+ 0,038	
Luftlagerung											
1 : 3	14	149,693	— 0,023	— 0,064	— 0,123	— 0,120	— 0,144	— 0,142	— 0,137	— 0,139	
		145,826	— 0,038	— 0,046	— 0,101	— 0,110	— 0,121	— 0,110	— 0,129	— 0,118	
		150,832	— 0,046	— 0,062	— 0,096	— 0,098	— 0,125	— 0,120	— 0,132	— 0,129	
		Mittel:	— 0,036	— 0,057	— 0,105	— 0,109	— 0,130	— 0,124	— 0,133	— 0,129	
	Wasserlagerung										
	1 : 3	14	151,157	+ 0,019	— 0,008	— 0,003	+ 0,003	— 0,003	+ 0,003	+ 0,021	+ 0,001
149,768			+ 0,017	— 0,002	— 0,010	— 0,003	— 0,004	— 0,018	+ 0,002	+ 0,010	
152,277			+ 0,005	— 0,012	— 0,022	— 0,003	— 0,011	— 0,001	+ 0,005	+ 0,011	
Mittel:			+ 0,014	— 0,007	— 0,012	— 0,001	— 0,006	— 0,005	+ 0,009	+ 0,007	

Längenänderungen von hydraul. Bindemitteln bei Luft- und Wasserlagerung.



3. Längenänderungen von Mörtel und Beton aus Portlandcement bei verschiedener Art der Lagerung.

Diese Untersuchung wurde auf Grund der Beratungen einer Subkommission der schweizerischen Kommission für das Studium des armierten Beton durchgeführt. Als Versuchskörper kamen Prismen von $36 \times 8 \times 8$ cm mit zwei, wie früher beschrieben, eingelagerten Glasstäbchen in 33 cm Abstand in Anwendung.

Als Bindemittel wurden zwei schweizerische Portlandcemente verwendet, deren Qualität durch nachfolgende Ergebnisse der Normenprobe gekennzeichnet ist:

	Marke Z			Marke V		
Spezifisches Gewicht	3,13			3,16		
Glühverlust	2,15			1,07 %		
Volumengewichte	1,21	1,46	1,98	1,20	1,45	1,96 kg/Liter
Abbindeverhältnisse: Anmachwasser	27			30 %		
Erhärtungsbeginn, Bindezeit	6 Std.; 15 Std.			4 1/2 Std.; 20 Std.		
Feinheit der Mahlung: Rückstand am 900. Maschensieb	0,1			0,1 %		
„ „ 4900. „	14,7			18,5 %		
Normenfestigkeit 1:3, Wasserlagerung						
Zug 7 Tage 28 Tage	19,6	24,3		19,5	23,1	kg/cm ²
Druck 7 „ 28 „	260	360		190,8	259	„

Die gewählten Mischungsverhältnisse waren beim Anmachen von Mörtel und Beton in plastischer Konsistenz:

Mörtel	1:1	1:3	1:5	in Gewichtsteilen
Beton	150	300	450 kg	auf 1 m ³ Kies- und Sandmischung.

Für den *Mörtel* wurde Zürcher Bausand verwendet von 5 mm Korngrösse im Maximum, für den *Beton* Sand derselben Herkunft mit 2 mm Korndurchmesser und darunter; als Kies kam Gartenkies von 8 bis 12 mm Korndurchmesser in Anwendung; das Verhältnis von Sand zu Kies betrug 1:2.

Die Körper wurden in solcher Zahl in eisernen Formen erzeugt, dass für jede Art der Lagerung je 2 Körper mit jedem Cement vorhanden waren; eine erste Serie wurde an der Luft gelagert, eine zweite Serie unter Wasser, eine dritte Serie unter feuchtem Sand.

Endlich wurden Körper derselben Abmessung mit Eiseneinlagen erzeugt und zwar:

1. mit Mörtel 1:3 und 4 Eisen à 5 mm Durchmesser entsprechend einer Armierung von 1,22 % des Bruttoquerschnittes des Prismas;
2. mit Mörtel 1:3 und 4 Eisen à 7 mm Durchmesser entsprechend einer Armierung von 2,41 % des Bruttoquerschnittes des Prismas.

Auf diese Weise wurden insgesamt 96 Körper vorbereitet, deren Länge an der beschriebenen Messbank nach einer Dauer von

4, 7, 28, 84, 210 Tagen, 1 Jahr, 1 1/2 Jahr

beobachtet und protokolliert worden ist.

Die Resultate sind in nachfolgenden Tabellen ausführlich zusammengestellt und die Mittelwerte der Längenänderungen umgerechnet in mm auf 1 m Länge in den Tafeln II und III in ihrem Verlaufe veranschaulicht.

Die Aenderungen sind wiederum in den ersten Wochen am stärksten; nach 4 Wochen steigen sowohl die Verkürzungen an der Luft wie die Dehnungen unter Wasser oder unter feuchtem Sand nur langsam; es tritt nach einem Jahre ein Zustand ein, der keine grosse Veränderung mehr erleidet; es ist möglich, dass Unterschiede in dem hygroskopischen Zustand der Luft (Sommer oder Winter) die auftretenden Differenzen bei Luftlagerung verursachen und daher eine weitere Verfolgung der Aenderungen der Prismenlängen zwecklos wird.

Die charakteristischen Werte der Längenänderungen in mm/m nach 28 Tagen und 1 1/2 Jahren sind in folgendem für die verschiedenen Lagerungsarten verkürzt zusammengestellt und zwar für beide Portlandcemente getrennt.

Längenänderungen in mm/m.

	Luftlagerung			Wasserlagerung			Feuchte Sandlagerung		
	28 Tage	1 1/2 Jahr	Zunahme	28 Tage	1 1/2 Jahr	Zunahme	28 Tage	1 1/2 Jahr	Zunahme
<i>1. Portlandcement V.</i>									
Mörtel 1:1	-0,61	-1,11	-0,50	+0,28	+0,66	+0,38	+0,39	+0,83	+0,44
„ 1:3	-0,52	-0,85	-0,33	+0,13	+0,28	+0,15	+0,13	+0,24	+0,11
„ 1:5	-0,44	-0,76	-0,32	+0,09	+0,15	+0,06	+0,11	+0,17	+0,06
Beton à 150 kg/m ³ K. u. S. .	-0,35	-0,41	-0,06	+0,02	+0,02	0	+0,01	+0,05	+0,04
„ à 300 „ „	-0,11	-0,38	-0,27	+0,06	+0,12	+0,06	+0,02	+0,10	+0,08
„ à 450 „ „	-0,11	-0,51	-0,40	+0,02	+0,27	+0,25	+0,04	+0,25	+0,21
Mörtel 1:3, Armierung 1,22 %	-0,32	-0,50	-0,18	+0,17	+0,24	+0,07	+0,22	+0,27	+0,05
„ 1:3, „ 2,41 %	-0,30	-0,35	-0,05	-0,02	+0,07	+0,09	+0,06	+0,15	+0,09
<i>2. Portlandcement Z.</i>									
Mörtel 1:1	-0,79	-1,09	-0,30	+0,52	+0,95	+0,43	+0,49	+0,93	+0,44
„ 1:3	-0,50	-0,79	-0,29	+0,26	+0,35	+0,09	+0,23	+0,34	+0,11
„ 1:5	-0,51	-0,67	-0,16	+0,14	+0,21	+0,07	+0,13	+0,24	+0,11
Beton à 150 kg/m ³ K. u. S. .	-0,38	-0,42	-0,04	0	+0,04	+0,04	+0,02	+0,02	0
„ à 300 „ „	-0,36	-0,41	-0,05	+0,15	+0,20	+0,05	+0,09	+0,18	+0,09
„ à 450 „ „	-0,47	-0,55	-0,08	+0,10	+0,23	+0,13	+0,09	+0,26	+0,17
Mörtel 1:3, Armierung 1,22 %	-0,37	-0,39	-0,02	+0,14	+0,25	+0,11	+0,11	+0,28	+0,17
„ 1:3, „ 2,41 %	-0,35	-0,37	-0,02	+0,15	+0,15	0	+0,09	+0,16	+0,07

Eine Durchsicht der Einzelresultate in den Tabellen zeigt, dass von einem Prisma zum anderen in gleicher Mischung und Alter grosse Unterschiede vorkommen; es wäre daher nicht berechtigt, absolute Zahlenwerte aus diesen doch ziemlich umfangreichen Messungen ziehen zu wollen.

Die grösste Zunahme geschieht zwischen dem 7-ten und 28-ten Tage; in den ersten Tagen besitzt der Mörtel oder Beton genügende Plastizität, dass gehinderte Längenänderungen ohne entsprechende Spannungen auftreten können; mit fortschreitender Erhärtung wächst die Festigkeit und das Elastizitätsmodul des Mörtels oder Beton, so dass ein Hindern der Längenänderungen namhafte Spannungen hervorruft; bei Luftlagerung und gleichzeitiger Beanspruchung des Materials auf Zug ist eine Rissbildung sicher zu erwarten.

Wird bei den nicht armierten und armierten Prismen in Mörtel 1:3 die Differenz der Längenänderung nach 1 1/2 Jahren der elastischen Längenänderung des Eisens Δl_e zugeschrieben, so erhalten wir folgende Zusammenstellung:

	Luftlagerung		Wasserlagerung		Feuchte Sandlagerung		
	Armierung		Armierung		Armierung		
Nach 1 1/2 Jahren ist	1,22 %	2,41 %	1,22 %	2,41 %	1,22 %	2,41 %	
mit Cement Marke V	Δl_e -0,35	-0,50	+0,04	+0,11	-0,03	+0,09	mm/m
„ „ „ Z	-0,40	-0,42	+0,10	+0,20	+0,06	+0,18	„
Mittel	-0,375	-0,46	+0,07	+0,155	+0,015	+0,135	„
Spannung im Eisen	-0,81	-0,99	+0,15	+0,33	+0,03	+0,29	t/cm ²
Kraft im Eisen	-0,63	-1,52	+0,12	+0,51	+0,02	+0,45	t
Entsprechende Spannung im Beton	+9,8	+23,7	-1,9	-8,0	-0,3	-7,0	kg/cm ²

Da der Beton auf Zug wesentlich höhere bleibende Längenänderungen aushalten kann wie auf Druck, sind die Werte +9,8 und +23,7 kg/cm² zu hoch ermittelt. Es wäre notwendig, den Betrag der bleibenden Dehnungen im Beton zu kennen, um eine Reduktion dieser Werte zu ermöglichen.

Portlandement, Marke Z.

a) Mörtel.

Alter der Proben	Probe-Nr.	Gewöhnliche Luftlagerung			Lagerung unter feuchtem Sand			Wasserlagerung			
		1:1	1:3	1:5	1:1	1:3	1:5	1:1	1:3	1:5	
Wassermenge		14 ‰	9 ‰	8 1/2 ‰	14 ‰	9 ‰	8 1/2 ‰	14 ‰	9 ‰	8 1/2 ‰	
48 Stdn. Luftlagerung		Ursprüngliche Stablänge in Millimetern									
		1	330,056	330,290	330,434	329,865	329,862	0,000	329,668	329,280	329,269
4 Tage		2	329,660	330,024	329,292	328,234	329,610	329,512	329,753	330,450	329,782
		Längenänderungen in Millimetern									
7 Tage		1	-0,056	-0,031	+0,009	+0,050	+0,013	0,000	+0,045	+0,024	+0,026
		2	-0,049	-0,009	+0,010	+0,039	+0,010	+0,033	+0,047	+0,025	+0,020
28 Tage		Mittel	-0,053	-0,020	+0,010	+0,045	+0,012	+0,033	+0,046	+0,025	+0,023
		1	-0,097	-0,031	-0,025	+0,079	+0,049	0,000	+0,083	+0,054	+0,022
84 Tage		2	-0,091	-0,033	-0,006	+0,101	+0,043	+0,035	+0,086	+0,040	+0,038
		Mittel	-0,094	-0,032	-0,016	+0,085	+0,046	+0,035	+0,085	+0,047	+0,030
210 Tage		1	-0,260	-0,171	-0,167	+0,148	+0,084	0,000	+0,157	+0,092	+0,051
		2	-0,260	-0,160	-0,170	+0,173	+0,066	+0,044	+0,183	+0,082	+0,042
1 Jahr		Mittel	-0,260	-0,166	-0,169	+0,161	+0,075	+0,044	+0,170	+0,087	+0,047
		1	-0,309	-0,223	-0,175	+0,187	+0,089	0,000	+0,208	+0,096	+0,048
1 1/2 Jahre		2	-0,293	-0,216	-0,200	+0,214	+0,089	+0,050	+0,254	+0,108	+0,052
		Mittel	-0,301	-0,220	-0,188	+0,200	+0,089	+0,050	+0,231	+0,102	+0,050
		1	-0,285	-0,219	-0,198	+0,257	+0,098	0,000	+0,266	+0,114	+0,082
		2	-0,289	-0,209	-0,190	+0,278	+0,106	+0,087	+0,314	+0,116	+0,075
		Mittel	-0,287	-0,214	-0,194	+0,268	+0,102	+0,087	+0,290	+0,115	+0,079
		1	-0,393	-0,304	-0,242	+0,251	+0,099	0,000	+0,263	+0,108	+0,065
		2	-0,402	-0,274	-0,224	+0,291	+0,109	+0,048	+0,312	+0,109	+0,075
		Mittel	-0,398	-0,289	-0,234	+0,271	+0,104	+0,048	+0,288	+0,109	+0,070
		1	-0,353	-0,257	-0,217	+0,290	+0,107	0,000	+0,294	+0,117	+0,064
		2	-0,364	-0,259	-0,223	+0,322	+0,114	+0,080	+0,332	+0,111	+0,074
		Mittel	-0,359	-0,258	-0,220	+0,306	+0,111	+0,080	+0,313	+0,114	+0,069

Portlandcement, Marke Z.

b) Beton.

Alter der Proben	Probe-Nr.	Gewöhnliche Luftlagerung			Lagerung unter feuchtem Sand			Wasserlagerung		
		150 kg/m ³	300 kg/m ³	450 kg/m ³	150 kg/m ³	300 kg/m ³	450 kg/m ³	150 kg/m ³	300 kg/m ³	450 kg/m ³
Wassermenge		6 1/2 ‰	7 ‰	7 1/2 ‰	6 1/2 ‰	7 ‰	7 1/2 ‰	6 1/2 ‰	7 ‰	7 1/2 ‰
Ursprüngliche Stablänge in Millimetern										
48 Stdn. Luftlagerung	1	328,531	329,427	329,826	330,129	329,266	329,199	330,386	329,202	329,680
	2	330,046	330,760	330,296	330,431	328,945	329,283	329,371	328,695	330,397
Längenänderungen in Millimetern										
4 Tage	1	— 0,034	— 0,007	— 0,035	— 0,010	+ 0,012	— 0,004	— 0,003	+ 0,022	— 0,019
	2	— 0,035	0,000	— 0,055	— 0,026	+ 0,019	+ 0,007	— 0,001	+ 0,019	+ 0,008
7 Tage	Mittel	— 0,035	— 0,004	— 0,045	— 0,018	+ 0,016	+ 0,002	— 0,002	+ 0,021	— 0,006
	1	— 0,058	— 0,027	— 0,039	— 0,008	+ 0,028	+ 0,016	+ 0,002	+ 0,053	0,000
28 Tage	2	— 0,072	— 0,035	+ 0,003	— 0,033	+ 0,028	+ 0,025	— 0,019	+ 0,045	+ 0,035
	Mittel	— 0,065	— 0,031	— 0,018	— 0,021	+ 0,028	+ 0,021	— 0,009	+ 0,049	+ 0,018
84 Tage	1	— 0,122	— 0,143	— 0,140	+ 0,018	+ 0,029	+ 0,016	+ 0,011	+ 0,057	+ 0,028
	2	— 0,130	— 0,094	— 0,170	— 0,004	+ 0,029	+ 0,042	— 0,011	+ 0,040	+ 0,036
210 Tage	Mittel	— 0,126	— 0,119	— 0,155	+ 0,007	+ 0,029	+ 0,029	0,000	+ 0,049	+ 0,032
	1	— 0,121	— 0,114	— 0,129	— 0,008	+ 0,018	+ 0,060	+ 0,007	+ 0,030	+ 0,058
1 Jahr	2	— 0,141	— 0,114	— 0,172	+ 0,004	+ 0,044	+ 0,074	+ 0,022	+ 0,032	+ 0,056
	Mittel	— 0,131	— 0,114	— 0,151	— 0,002	+ 0,031	+ 0,067	+ 0,015	+ 0,031	+ 0,057
1 1/2 Jahre	1	— 0,098	— 0,110	— 0,140	+ 0,018	+ 0,026	+ 0,065	+ 0,012	+ 0,060	+ 0,093
	2	— 0,092	— 0,108	— 0,144	— 0,004	+ 0,045	+ 0,081	+ 0,013	+ 0,055	+ 0,091
1 1/2 Jahre	Mittel	— 0,095	— 0,109	— 0,142	+ 0,017	+ 0,036	+ 0,073	+ 0,013	+ 0,058	+ 0,092
	1	— 0,143	— 0,130	— 0,179	+ 0,015	+ 0,054	+ 0,063	+ 0,013	+ 0,066	+ 0,053
1 1/2 Jahre	2	— 0,133	— 0,149	— 0,215	— 0,017	+ 0,062	+ 0,068	+ 0,014	+ 0,071	+ 0,096
	Mittel	— 0,138	— 0,140	— 0,197	— 0,001	+ 0,058	+ 0,066	+ 0,014	+ 0,069	+ 0,075
1 1/2 Jahre	1	— 0,140	— 0,130	— 0,176	+ 0,014	+ 0,065	+ 0,095	+ 0,013	+ 0,072	+ 0,059
	2	— 0,138	— 0,141	— 0,186	— 0,004	+ 0,054	+ 0,077	+ 0,013	+ 0,062	+ 0,090
1 1/2 Jahre	Mittel	— 0,139	— 0,136	— 0,181	+ 0,005	+ 0,060	+ 0,086	+ 0,013	+ 0,067	+ 0,075

Portlandcement, Marke Z.

c) Mörtel 1:3 mit Armierung.

Alter der Proben	Probe-Nr.	Gewöhnliche Luftlagerung		Lagerung unter feuchtem Sand		Wasserlagerung	
		5 mm Armierung	7 mm Armierung	5 mm Armierung	7 mm Armierung	5 mm Armierung	7 mm Armierung
Wassermenge		9 ‰	9 ‰	9 ‰	9 ‰	9 ‰	9 ‰
48 Stunden Luftlagerung	Ursprüngliche Stablänge in Millimetern						
	1	329,828	329,540	329,479	329,876	330,059	330,589
	2	329,809	329,922	329,164	329,302	329,547	328,998
4 Tage	Längenänderungen in Millimetern						
	1	0,000	— 0,028	+ 0,029	+ 0,006	+ 0,027	+ 0,001
	2	+ 0,001	— 0,020	+ 0,027	+ 0,016	+ 0,004	+ 0,010
7 Tage	Mittel	+ 0,001	— 0,024	+ 0,028	+ 0,011	+ 0,016	+ 0,006
	1	— 0,010	— 0,028	+ 0,042	+ 0,021	+ 0,040	+ 0,009
	2	— 0,030	— 0,049	+ 0,036	+ 0,016	+ 0,013	+ 0,013
28 Tage	Mittel	— 0,020	— 0,039	+ 0,039	+ 0,019	+ 0,027	+ 0,011
	1	— 0,106	— 0,113	+ 0,042	+ 0,020	+ 0,069	+ 0,040
	2	— 0,135	— 0,120	+ 0,030	+ 0,038	+ 0,026	+ 0,059
84 Tage	Mittel	— 0,121	— 0,117	+ 0,036	+ 0,029	+ 0,048	+ 0,050
	1	— 0,105	— 0,091	+ 0,055	+ 0,026	+ 0,075	+ 0,039
	2	— 0,138	— 0,093	+ 0,044	+ 0,052	+ 0,078	+ 0,051
210 Tage	Mittel	— 0,122	— 0,092	+ 0,050	+ 0,039	+ 0,077	+ 0,045
	1	— 0,040	— 0,076	+ 0,090	+ 0,052	+ 0,102	+ 0,060
	2	— 0,055	— 0,064	+ 0,085	+ 0,073	+ 0,093	+ 0,060
1 Jahr	Mittel	— 0,048	— 0,070	+ 0,088	+ 0,063	+ 0,098	+ 0,060
	1	— 0,123	— 0,133	+ 0,086	+ 0,036	+ 0,095	+ 0,045
	2	— 0,133	— 0,113	+ 0,072	+ 0,051	+ 0,083	+ 0,052
1 1/2 Jahre	Mittel	— 0,128	— 0,123	+ 0,079	+ 0,044	+ 0,089	+ 0,049
	1	— 0,102	— 0,124	+ 0,100	+ 0,051	+ 0,092	+ 0,049
	2	— 0,119	— 0,109	+ 0,085	+ 0,052	+ 0,073	+ 0,050
	Mittel	— 0,111	— 0,117	+ 0,093	+ 0,052	+ 0,083	+ 0,050

Portlandcement, Marke V.

a) Mörtel.

Alter der Proben	Probe-Nr.	Gewöhnliche Luftlagerung			Lagerung unter feuchtem Sand			Wasserlagerung		
		1 : 1	1 : 3	1 : 5	1 : 1	1 : 3	1 : 5	1 : 1	1 : 3	1 : 5
Wassermenge		15 %	10 %	9 1/2 %	15 %	10 %	9 1/2 %	15 %	10 %	9 1/2 %
Ursprüngliche Stablänge in Millimetern										
48 Stdn. Luftlagerung	1	330,107	330,073	329,757	328,704	329,921*)	329,163	330,567	329,413	329,863
	2	330,173	330,267	330,248	329,722	329,083*)	330,101	329,364	330,410	330,079
Längenänderungen in Millimetern										
4 Tage	1	— 0,060	0,000	+ 0,003	+ 0,014	—	+ 0,015	+ 0,012	+ 0,027	+ 0,015
	2	— 0,042	— 0,006	+ 0,009	+ 0,031	—	+ 0,011	+ 0,012	+ 0,025	+ 0,018
7 Tage	Mittel	— 0,051	— 0,003	+ 0,006	+ 0,023	—	+ 0,013	+ 0,012	+ 0,026	+ 0,017
	1	— 0,086	— 0,046	— 0,018	+ 0,040	+ 0,014	+ 0,024	+ 0,044	+ 0,019	+ 0,040
	2	— 0,052	— 0,042	— 0,002	+ 0,049	+ 0,001	+ 0,025	+ 0,040	+ 0,029	+ 0,034
28 Tage	Mittel	— 0,069	— 0,044	— 0,010	+ 0,045	+ 0,008	+ 0,025	+ 0,042	+ 0,024	+ 0,037
	1	— 0,201	— 0,182	— 0,147	+ 0,097	+ 0,045	+ 0,036	+ 0,123	+ 0,024	+ 0,039
	2	— 0,200	— 0,158	— 0,142	+ 0,156	+ 0,040	+ 0,033	+ 0,065	+ 0,063	+ 0,022
84 Tage	Mittel	— 0,201	— 0,170	— 0,145	+ 0,127	+ 0,043	+ 0,035	+ 0,094	+ 0,044	+ 0,031
	1	— 0,289	— 0,241	— 0,209	+ 0,154	+ 0,053	+ 0,027	+ 0,157	+ 0,049	+ 0,025
	2	— 0,290	— 0,251	— 0,219	+ 0,208	+ 0,011	+ 0,030	+ 0,133	+ 0,063	+ 0,013
210 Tage	Mittel	— 0,290	— 0,246	— 0,214	+ 0,181	+ 0,032	+ 0,029	+ 0,145	+ 0,056	+ 0,019
	1	— 0,309	— 0,237	— 0,191	+ 0,196	+ 0,072	+ 0,043	+ 0,205	+ 0,067	+ 0,048
	2	— 0,298	— 0,257	— 0,193	—	+ 0,071	+ 0,052	+ 0,158	+ 0,092	+ 0,047
1 Jahr	Mittel	— 0,304	— 0,247	— 0,192	+ 0,196	+ 0,072	+ 0,048	+ 0,182	+ 0,080	+ 0,048
	1	— 0,409	— 0,328	— 0,254	+ 0,199	+ 0,066	+ 0,060	+ 0,204	+ 0,074	+ 0,043
	2	— 0,409	— 0,335	— 0,256	+ 0,250	+ 0,067	+ 0,066	+ 0,160	+ 0,092	+ 0,044
1 1/2 Jahre	Mittel	— 0,409	— 0,332	— 0,255	+ 0,225	+ 0,067	+ 0,063	+ 0,182	+ 0,083	+ 0,044
	1	— 0,362	— 0,275	— 0,243	+ 0,231	+ 0,073	+ 0,052	+ 0,246	+ 0,090	+ 0,044
	2	— 0,372	— 0,284	— 0,255	+ 0,314	+ 0,085	+ 0,060	+ 0,190	+ 0,097	+ 0,052
	Mittel	— 0,367	— 0,280	— 0,249	+ 0,273	+ 0,079	+ 0,056	+ 0,218	+ 0,094	+ 0,048

*) Ursprüngliche Stablänge nach 4 Tagen.

Portlandcement, Marke V.

b) Beton.

Alter der Proben	Probe- Nr.	Gewöhnliche Luftlagerung			Lagerung unter feuchtem Sand			Wasserlagerung		
		150 kg/m ³	300 kg/m ³	450 kg/m ³	150 kg/m ³	300 kg m ³	450 kg/m ³	150 kg/m ³	300 kg m ³	450 kg/m ³
Wassermenge		6 ‰	7 ‰	8 ‰	6 ‰	7 ‰	8 ‰	6 ‰	7 ‰	8 ‰
48 Stdn. Luft- lagerung	Ursprüngliche Stablänge in Millimetern									
	1	328,933	329,895	330,796	330,447	329,742	330,424	329,046	331,280	329,782
	2	330,569	330,445	330,446	330,543	330,881	329,941	329,229	330,675	330,572
4 Tage	Längenänderungen in Millimetern									
	1	- 0,014	- 0,018	+ 0,008	0,000	+ 0,005	+ 0,001	- 0,003	+ 0,024	+ 0,007
	2	- 0,013	- 0,023	- 0,007	+ 0,003	+ 0,005	+ 0,011	- 0,002	+ 0,008	+ 0,003
7 Tage	Mittel	- 0,014	- 0,021	+ 0,001	+ 0,002	+ 0,005	+ 0,006	- 0,003	+ 0,016	+ 0,005
	1	- 0,044	- 0,039	- 0,039	- 0,021	+ 0,010	+ 0,012	- 0,012	+ 0,024	+ 0,022
	2	- 0,038	- 0,030	- 0,035	- 0,006	+ 0,023	+ 0,022	- 0,010	+ 0,021	+ 0,036
28 Tage	Mittel	- 0,041	- 0,035	- 0,037	- 0,014	+ 0,017	+ 0,017	- 0,011	+ 0,023	+ 0,029
	1	- 0,101	- 0,111	- 0,126	+ 0,009	+ 0,005	0,000	0,000	+ 0,024	+ 0,011
	2	- 0,132	- 0,109	- 0,134	- 0,002	+ 0,011	+ 0,026	- 0,014	+ 0,013	+ 0,004
84 Tage	Mittel	- 0,117	- 0,110	- 0,130	+ 0,004	+ 0,008	+ 0,013	+ 0,007	+ 0,019	+ 0,008
	1	- 0,113	- 0,112	- 0,104	+ 0,018	+ 0,036	+ 0,040	+ 0,011	+ 0,024	+ 0,058
	2	- 0,133	- 0,096	- 0,153	+ 0,012	+ 0,071	+ 0,040	+ 0,017	+ 0,038	+ 0,060
210 Tage	Mittel	- 0,123	- 0,104	- 0,129	+ 0,015	+ 0,054	+ 0,040	+ 0,014	+ 0,031	+ 0,059
	1	- 0,097	- 0,105	- 0,130	+ 0,033	+ 0,034	+ 0,050	+ 0,014	+ 0,032	+ 0,062
	2	- 0,109	- 0,110	- 0,132	+ 0,015	+ 0,030	+ 0,061	+ 0,006	+ 0,042	+ 0,075
1 Jahr	Mittel	- 0,103	- 0,107	- 0,131	+ 0,024	+ 0,032	+ 0,056	+ 0,010	+ 0,037	+ 0,069
	1	- 0,132	- 0,140	- 0,170	+ 0,011	+ 0,020	+ 0,043	+ 0,008	+ 0,031	+ 0,059
	2	- 0,144	- 0,145	- 0,202	+ 0,010	+ 0,038	+ 0,059	+ 0,011	+ 0,055	+ 0,064
1 1/2 Jahre	Mittel	- 0,138	- 0,143	- 0,186	+ 0,011	+ 0,029	+ 0,051	+ 0,010	+ 0,043	+ 0,062
	1	- 0,130	- 0,130	- 0,163	+ 0,013	+ 0,020	+ 0,090	+ 0,005	+ 0,035	+ 0,099
	2	- 0,138	- 0,122	- 0,173	+ 0,016	+ 0,043	+ 0,073	+ 0,005	+ 0,047	+ 0,080
	Mittel	- 0,134	- 0,126	- 0,168	+ 0,015	+ 0,032	+ 0,082	+ 0,005	+ 0,041	+ 0,090

Portlandcement, Marke V.

c) Mörtel 1:3 mit Armierung.

Alter der Proben	Probe-Nr.	Gewöhnliche Luftlagerung		Lagerung unter feuchtem Sand		Wasserlagerung	
		5 mm Armierung	7 mm Armierung	5 mm Armierung	7 mm Armierung	5 mm Armierung	7 mm Armierung
Wassermenge		10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %
48 Stunden Luftlagerung	Ursprüngliche Stablänge in Millimetern						
	1	329,795	328,240	330,427	329,464	330,010	329,374
	2	330,435	330,245	329,594	328,877	330,629	329,330
4 Tage	Längenänderungen in Millimetern						
	1	- 0,005	—	+ 0,022	—	+ 0,011	—
	2	- 0,003	—	+ 0,017	—	+ 0,010	—
7 Tage	Mittel	- 0,004	—	+ 0,020	—	+ 0,011	—
	1	- 0,035	- 0,040	+ 0,035	- 0,006	+ 0,013	- 0,018
	2	- 0,021	- 0,037	+ 0,010	+ 0,001	+ 0,015	- 0,011
28 Tage	Mittel	- 0,028	- 0,039	+ 0,023	- 0,003	+ 0,014	- 0,015
	1	- 0,112	- 0,081	+ 0,067	+ 0,013	+ 0,065	+ 0,002
	2	- 0,099	- 0,114	+ 0,079	+ 0,026	+ 0,049	- 0,011
84 Tage	Mittel	- 0,106	- 0,098	+ 0,073	+ 0,020	+ 0,057	- 0,005
	1	- 0,126	- 0,108	+ 0,053	+ 0,026	+ 0,070	+ 0,037
	2	- 0,117	- 0,124	+ 0,053	+ 0,025	+ 0,046	+ 0,007
210 Tage	Mittel	- 0,122	- 0,116	+ 0,053	+ 0,026	+ 0,058	+ 0,022
	1	- 0,144	- 0,087	+ 0,074	+ 0,031	+ 0,060	+ 0,014
	2	- 0,136	- 0,094	+ 0,056	+ 0,062	+ 0,074	+ 0,005
1 Jahr	Mittel	- 0,140	- 0,091	+ 0,065	+ 0,047	+ 0,067	+ 0,010
	1	- 0,178	- 0,142	+ 0,063	+ 0,019	+ 0,060	+ 0,026
	2	- 0,178	- 0,146	+ 0,066	+ 0,043	+ 0,064	+ 0,007
1 1/2 Jahre	Mittel	- 0,178	- 0,144	+ 0,065	+ 0,031	+ 0,062	+ 0,017
	1	- 0,167	- 0,105	+ 0,096	+ 0,049	+ 0,059	+ 0,021
	2	- 0,160	- 0,129	+ 0,082	+ 0,050	+ 0,099	+ 0,026
	Mittel	- 0,164	- 0,117	+ 0,089	+ 0,050	+ 0,079	+ 0,024

4. Einfluss der Schwindung des Beton auf die inneren Spannungen des armierten Beton.

Dass die Schwindung des Beton durch Eiseneinlagen verhindert wird und infolgedessen innere Spannungen auftreten müssen, ist eine bekannte Tatsache; die Schätzung der Spannungen scheiterte bisher an der Schwierigkeit, die effektive Verkürzung der Eiseneinlagen hinreichend genau festzustellen. Es geht aus den besprochenen Versuchen hervor, dass in den ersten Wochen die Hemmung im Verkürzen des Beton weniger stark sich geltend macht, wie bei längerer Erhärtungsdauer; der Beton hat in der ersten Zeit noch die Möglichkeit, sich plastisch oder bleibend zu verkürzen, ohne grössere innere Beanspruchung von Eisen und Beton zu verursachen. Von der Gesamtschwindung wird daher nur ein Teil ϵ_s , auf die Längeneinheit bezogen, innere Spannungen verursachen; wie gross sind diese Spannungen im Eisen und im Beton?

Es bedeuten:

$F_e = \alpha F_b$ der Querschnitt der Armierung,

F_b der Querschnitt des Beton,

ϵ_e die durch das Schwinden verursachte Verkürzung des Eisens,

ϵ_b die durch das Vorhandensein der Armierung verhinderte Verkürzung des Beton durch das Schwinden, so dass $\epsilon_b = \epsilon_s - \epsilon_e$,

E_e und E_b die Elastizitätscoefficienten von Eisen und Beton, letzteres Material als elastisch vorausgesetzt,

σ_e, σ_{bz} die durch das Schwinden verursachten Spannungen im Eisen und im Beton.

Die Gesamtkraft im Eisen ist der Gesamtkraft im Beton gleich, somit

$$\sigma_e F_e = \sigma_b \cdot F_b$$

$$\epsilon_e \cdot E_e \cdot F_e = (\epsilon_s - \epsilon_e) E_b \cdot F_b \text{ hieraus folgt } \epsilon_e = \epsilon_s \cdot \frac{E_b F_b}{E_e F_e + E_b F_b} = \epsilon_s \cdot \frac{E_b}{E_e \cdot \alpha + E_b}$$

ist $\frac{E_e}{E_b} = n$, so wird $\epsilon_e = \epsilon_s \cdot \frac{1}{1 + n\alpha}$

die Druckspannung im Eisen $\sigma_e = E_e \cdot \epsilon_s \cdot \frac{1}{1 + n\alpha}$

die Zugspannung im Beton $\sigma_{bz} = E_b \cdot \left(\epsilon_s - \epsilon_s \cdot \frac{1}{1 + n\alpha} \right) = E_b \cdot \epsilon_s \cdot \frac{n\alpha}{1 + n\alpha} = E_e \cdot \epsilon_s \cdot \frac{\alpha}{1 + n\alpha}$

Die Werte σ_e und σ_{bz} für diverse Verhältnisse sind in folgender Zusammenstellung enthalten:

und zwar für $\epsilon_s = \frac{0,01}{100}$ $E_e = 2150$ $E_e \cdot \epsilon_s = 0,215$

Normungszahl $\frac{0,01}{100}$

Druckspannungen im Eisen.

$n =$ %	5	10	15	20	
$\alpha = 0,5$	0,210	0,205	0,200	0,195	t/cm ²
1,0	0,205	0,195	0,187	0,179	"
1,5	0,200	0,187	0,176	0,165	"
2,0	0,195	0,179	0,165	0,154	"
2,5	0,191	0,172	0,156	0,143	"
3,0	0,187	0,165	0,148	0,134	"
3,5	0,183	0,159	0,141	0,136	"
4,0	0,179	0,154	0,134	0,119	"
5,0	0,172	0,143	0,123	0,107	"

n = 5 bis 20 allmählich für Betondruck und für Betonzug gelten Werte

Höher diese Zahlen? In sind doch nur 1,22% n. 2,71% Armierungen vorhanden gewesen.

Zugspannungen im Beton.

$n =$ %	5	10	15	20	
$\alpha = 0,5$	1,05	1,02	1,00	0,97	kg/cm ²
1,0	2,05	1,95	1,87	1,79	"
1,5	3,00	2,80	2,63	2,47	"
2,0	3,90	3,58	3,30	3,08	"
2,5	4,77	4,31	3,91	3,57	"
3,0	5,60	4,95	4,43	4,02	"
3,5	6,40	5,55	4,94	4,74	"
4,0	7,16	6,16	5,36	4,76	"
5,0	8,60	7,15	6,15	5,35	"

In den durch Momente oder äussere Kräfte *auf Zug beanspruchten Eisenbetonteilen* werden bei Luftlagerung Spannungen durch Schwinden so lange auftreten bis die Zugfestigkeit des Beton erschöpft ist. Wird dieselbe zu $\frac{1}{10}$ der Druckfestigkeit angenommen, so stellen sich die Verhältnisse bei einem

Schwinden $\varepsilon_s = \frac{0,03}{100}$ folgendermassen:

Druckfestigkeit des Beton	150	300 kg/cm ²
Zugfestigkeit, Annahme	15	30 „
$n = \text{ca.}$	10	5 „

Spannungen durch das Schwinden	<i>im Beton</i>		<i>im Eisen</i>		<i>im Beton</i>		<i>im Eisen</i>	
	für $\alpha = 1\%$	+	5,85 kg/cm ²	—	0,585 t/cm ²	6,15 kg/cm ²	—	0,615 t/cm ²
für $\alpha = 2\%$	+	10,74 „	—	0,537 „	11,70 „	—	0,585 „	
für $\alpha = 3\%$	+	14,85 „	—	0,495 „	16,80 „	—	0,561 „	
für $\alpha = 4\%$	+	18,48 „	—	0,462 „	21,48 „	—	0,537 „	
für $\alpha = 5\%$	+	21,45 „	—	0,429 „	25,80 „	—	0,516 „	

Hier gilt als Armierungsprozent derjenige des Zuggurtes bei einem Balken, d. h. mehr wie das Doppelte des gebräuchlichen Armierungsprozenten des Balkens.

Es geht aus dieser Zusammenstellung hervor, dass bei schwacher Armierung und mittelmässigem Beton sehr bald die Schwindspannungen den Betrag der Zugfestigkeit erreichen, so dass die Innehaltung einer Grenze der Zugspannungen unter dem Einfluss der Belastungen vor Rissen nicht schützt. Ist der Beton sehr guter Qualität, so ist die Grenze für das Auftreten der Risse wohl in günstiger Weise verschoben, eine Sicherheit gegen Rissbildung wäre jedoch nur vorhanden, wenn die zulässige Spannung wesentlich unter den in der Praxis möglichen Werten bleiben würde; die Anwendung von Balken mit einer armierten Rippe wäre völlig ausgeschlossen, wenn bei Luftlagerung Risse sicher vermieden werden sollten.

Wird ein Konstruktionsteil *auf Druck* beansprucht, so stellen sich die Verhältnisse bei Luftlagerung und Voraussetzung eines Schwindens von 0,3 mm/m¹ folgendermassen:

Es werden Säulen aus Eisenbeton mit einer Armierung von 1, 2 und 3% auf 30 kg/cm² zentrische mittlere Beanspruchung belastet

Druckfestigkeit des Beton	150	300 kg/cm ²
Zugfestigkeit des Beton (Annahme)	15	30 „
$n = \text{ca.}$	10	5 „

Armierung	<i>1</i>			<i>2</i>			<i>3</i>			°/o		
	Schwindspannung im <i>Beton</i>	+	5,85	+	10,74	+	14,85	+	6,15		+	11,70
Spannung von der Belastung	—	30,00	—	30,00	—	30,00	—	30,00	—	30,00	—	30,00 „
Resultierende Spannung	—	24,15	—	19,26	—	15,15	—	23,85	—	18,30	—	13,20 „
Schwindspannung im <i>Eisen</i>	—	0,585	—	0,537	—	0,495	—	0,615	—	0,585	—	0,561 t/cm ²
Spannung von der Belastung	—	0,300	—	0,300	—	0,300	—	0,150	—	0,150	—	0,150 „
Resultierende Spannung	—	0,885	—	0,837	—	0,795	—	0,765	—	0,735	—	0,711 „

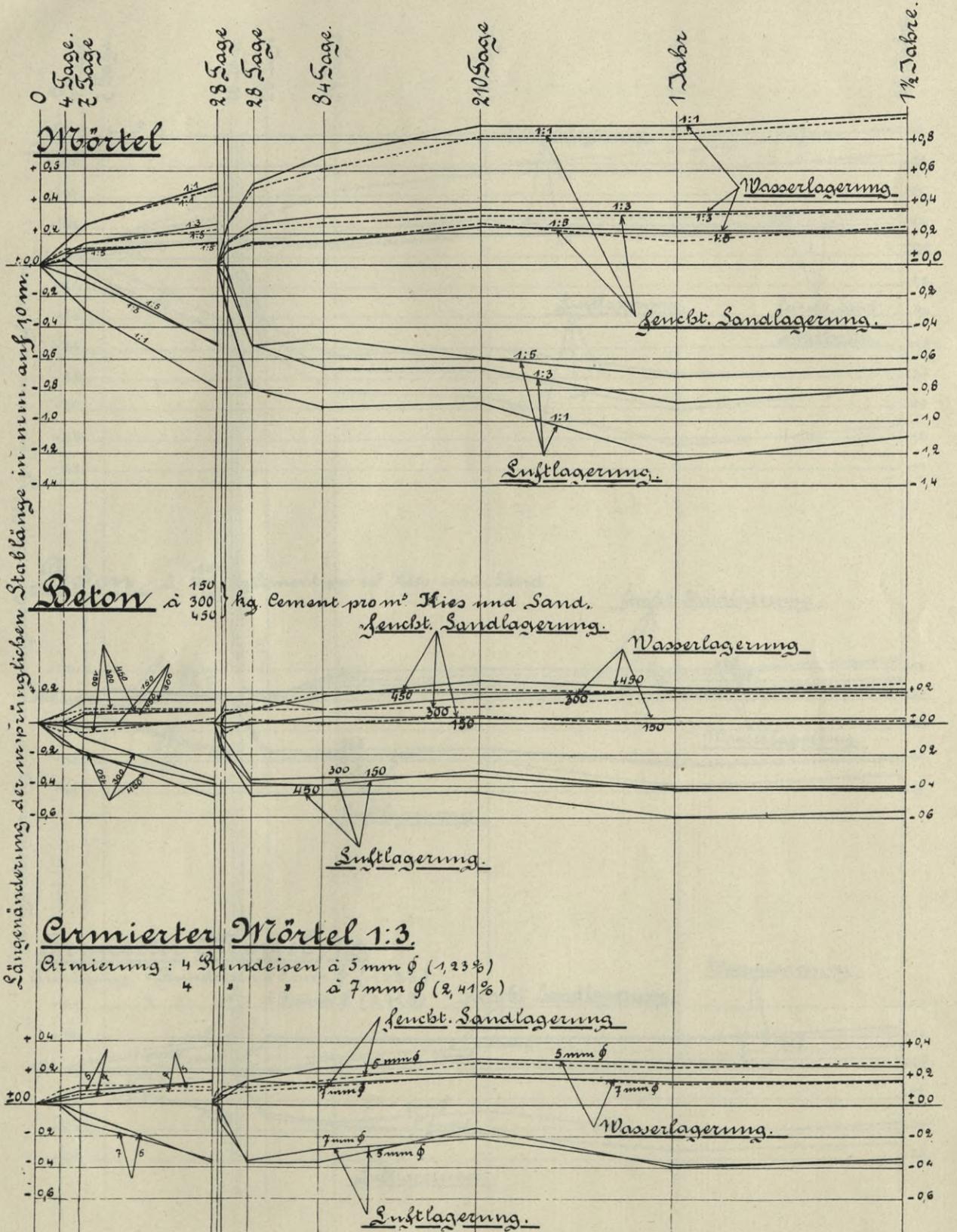
Es ist der Fall möglich, dass eine sehr starke Armierung infolge des Schwindens des Beton letzteren gänzlich entlasten würde, so dass die Gesamtbelastung von dem Eisen aufzunehmen wäre.

In Wirklichkeit wird das Schwindmass von der Annahme 0,3 mm/m¹ etwas abweichen, so dass die in Obigem enthaltenen Spannungswerte mehr zur Veranschaulichung des Einflusses des Schwindens, als wie absolute Werte aufzufassen sind.



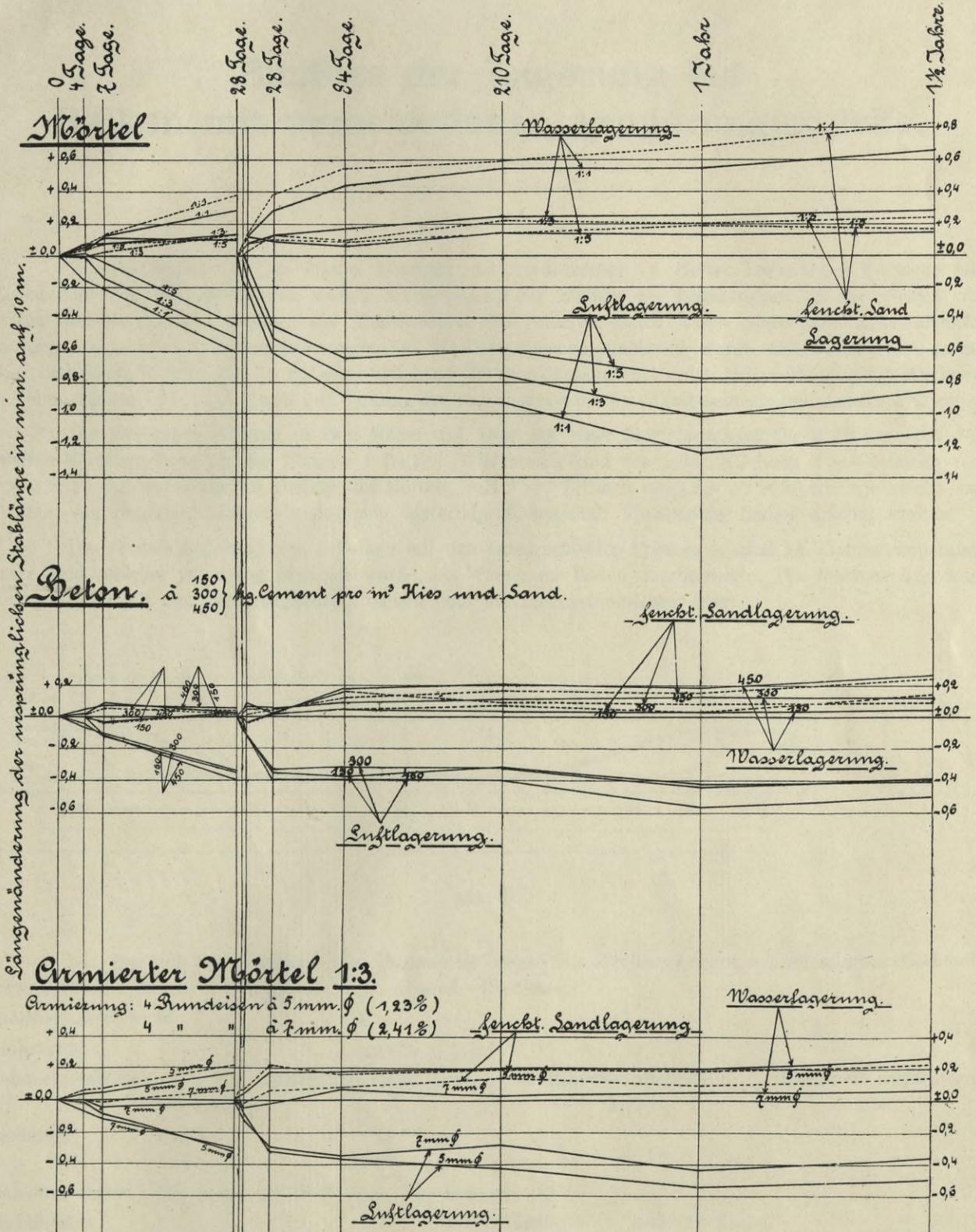
Längenänderungen von Mörtel und Beton bei Lagerung an der Luft,
unter Wasser und in feuchtem Sand.

Portlandcement. 7.



Längenänderungen von Mörtel und Beton bei Lagerung an der Luft,
unter Wasser und in feuchtem Sand.

Portlandcement. V.



Einfluss der Lagerung bei Balken mit verschiedener Armierungsstärke.

Zur Ergänzung der im ersten Abschnitt des vorliegenden 13. Heftes behandelten Versuche mit Eisenbetonbalken mit verschieden starker Armierung ist der Einfluss der Lagerungsart an zwei Serien von je fünf Balken, deren Anordnung und Abmessungen den früheren gleich waren (siehe Abb. 1), untersucht worden. Da jedoch die Längenänderungen mit der Cementmenge zunehmen, wurde statt Beton à 300 kg/m³ Kies und Sand, Mörtel à 600 kg auf ein Kubikmeter Zürcher Bausand verwendet, entsprechend einer Mischung in Volumenteilen von 1:2,3, damit die Wirkung der Lagerungsart in kurzer Zeit deutlich zum Ausdruck komme.

Die Erzeugung geschah in zwei Malen und zwar mit einer Mörtelmischung für 6 Balken, mit der zweiten Mörtelmischung für die übrigen 4 Balken. Gleichzeitig sind von jeder Mischung 2 × 6 Prismen von 4 × 4 × 16 cm, wie solche zur Prüfung des Mörtels, und 2 × 3 Prismen von 12 × 12 × 36 cm, wie solche zur Prüfung von Beton seit Jahren in der eidg. Materialprüfungsanstalt Verwendung finden, erzeugt worden.

Die *feuchte Lagerung* von 5 Balken mit den entsprechenden Prismen geschah bei Zimmertemperatur unter Sand, welcher jeden Tag begossen wurde, bis Wasser am Boden durchsickerte. Die *trockene Lagerung* von 5 Balken mit den entsprechenden Prismen fand bei Zimmertemperatur statt.

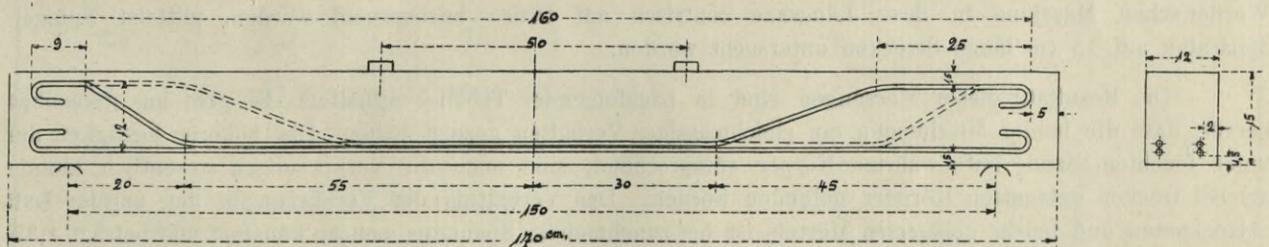


Abb. 1

Die Qualität des Cementes. Als Bindemittel wurde ein Portlandcement schweizerischer Herkunft verwendet; die übliche Normenprobe ergab folgende Resultate:

Spezifisches Gewicht:	3,16		
Glühverlust:	0,91 %		
Volumengewichte:	maschinell eingestäubt	in Einlieferungszustand	maschinell eingerüttelt
	pro Liter kg	1,17	1,45
Bindezeit:	Beginn	4 Std. 45 Min.	
	Ende	13 Std.	
Mahlungsfeinheit:	Rückstand auf dem 4900. Maschensieb	11,9 %	
Festigkeiten:		nach 7 Tagen	nach 28 Tagen
	Zugfestigkeit kg/cm ²	31,8	36,1
	Druckfestigkeit „	344	445

Die Festigkeit des Mörtels. Die Prismen sind im gleichen Alter wie die Balken, d. h. 50 Tage nach ihrer Erzeugung, zuerst auf Biegung, sodann auf Druck mit beiden Prismahälften (zwischen Stahlplatten von 4 resp. 12 cm Breite) erprobt worden.

Die erzielten Resultate sind als Mittel der Einzelfestigkeiten in nachfolgender Tabelle enthalten:

Prismen und Mischung	Feuchte Lagerung		Trockene Lagerung	
	Biegungs- festigkeit	Druck- festigkeit	Biegungs- festigkeit	Druck- festigkeit
	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²
1. Mischung				
Prismen 4 × 4 × 16	83,0	610	59,9	335
Prismen 12 × 12 × 36	81,0	446	59,2	337
2. Mischung				
Prismen 4 × 4 × 16	70,2	565	61,6	342
Prismen 12 × 12 × 36	74,2	375	59,5	334

Das Verhalten des trocken gelagerten Mörtels ist bei den kleineren und grösseren Prismen auffallend gleichmässig; bei feuchter Lagerung sind die Druckfestigkeiten der grösseren Prismen wesentlich kleiner wie diejenigen der 4×4 cm starken Prismen geblieben. Eine Erklärung hiefür gibt der Umstand, dass der Einfluss der Lagerung von der Oberfläche nach dem Innern eines Körpers stattfindet; kleinere Prismen werden daher diesem Einfluss in ihrer ganzen Masse unterworfen, bevor das Innere der grösseren Prismen eine Aenderung infolge der Lagerungsart erfährt. Dass die Biegezugfestigkeiten gleiche Werte bei kleineren und grösseren Prismen erreicht haben, ist wohl ein Beweis für die gegebene Erklärung, indem diese Werte durch den Widerstand der äusseren von der Lagerung gleich beeinflussten Schicht bedingt sind.

Die *elastischen Eigenschaften* des Beton sind an Prismen von 12×12×36 cm, welche auf der Werder'schen Maschine in ihrer Längsaxe centrisch auf Druck beansprucht wurden, mittelst Spiegelapparaten auf 15 cm lange Strecken untersucht worden.

Die Resultate dieser Messungen sind in nachfolgender Tabelle enthalten. Es geht aus denselben hervor, dass die beiden Mischungen ein gleichmässiges Verhalten gezeigt haben. Der höheren Festigkeit der unter feuchtem Sande aufbewahrten Körper entsprechend, sind auch die Verkürzungen wesentlich kleiner als bei trocken gelagerten Körpern gefunden worden. Das Verhältnis der Verkürzungen des an der Luft getrockneten und feucht gelagerten Mörtels ist bei zunehmender Spannung nahezu konstant und beträgt 1,33. Dieses Ergebnis wird von Einfluss auf die zu erwartenden Durchbiegungen der armierten Balken sein.

Weitere Messungen der Druckwirkung an den Balken sind nicht durchgeführt worden und der Wert n ($E_{\text{Eisen}}:E_{\text{Beton}}$) bei den nachfolgenden Ermittlungen wurde für höhere Spannungen gleich 10 für die trocken gelagerten und gleich 7,5 für die nass gelagerten Balken gesetzt; das Verhältnis 1,33 dieser Zahlen entspricht demjenigen der Verkürzungen.

Elastizitätsmessungen an Prismen 12 × 12 × 36, Alter 53 Tage.

Total Spannung in kg/cm ²	Spannung von der ursprünglichen an gerechnet kg/cm ²	Verkürzungen auf 15 cm in $\frac{\text{cm}}{100,000}$				Verhältnis der Δl bei Lagerung an der Luft und in feuchtem Sand
		Luftlagerung		Feuchte Lagerung		
		Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	
3,3	0	0	0	0	0	
20,0	16,7	82	78	60	63	1,30
36,7	33,4	169	165	123	130	1,31
3,3	0	7	5	—2	—1	
36,7	33,4	171	164	122	128	1,34
53,4	50,1	261	255	190	198	1,32
70,0	66,7	360	347	261	275	1,32
3,3	0	21	13	—2	—0	
70,0	66,7	361	349	259	274	1,33
86,7	83,4	458	444	331	350	1,32
103	99,7	563	547	407	429	1,33
3,3	0	42	35	3	7	
103	99,7	570	555	409	430	1,34
120	116,7	682	656	486	509	1,34
137	133,7	787	773	562	593	1,35
3,3	0	76	71	8	16	
137	133,7	800	—	566	598	
153	149,7	922	—	645	683	
170	166,7	1048	—	726	773	
3,3	0	125	—	20	33	

Durchbiegungen infolge der trockenen Lagerung. Von der dritten Woche an sind an den trocken aufbewahrten, unbelasteten Balken die Durchbiegungen, infolge Schwindung des Mörtels, auf 1,50 m in Trägermitte beobachtet worden. Die Ergebnisse der Messungen gehen aus folgender Tabelle hervor:

Balken Nr.	Armierung in %	Durchbiegungen in Millimetern von 3 Wochen an nach				
		4	7	14	21	28 Tagen
I	1,68	0,1	0,1	0,3	0,35	0,4
II	2,55	0	0,1	0,2	0,2	0,4
III	3,63	0	0,1	0,4	0,4	0,4
IV	4,20	0	0,2	0,3	0,4	0,5
V	4,91	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7

Man ersieht hieraus deutlich, dass die Eiseneinlagen auf der Zugseite der Balken ein Hemmen der Schwindung des Mörtels und innere Spannungen hervorgebracht haben.

Erprobung der Balken. Die Balken wurden wie die früheren auf der Biegemaschine für verteilte Belastung bei 1,50 m Stützweite, der Einwirkung von zwei konzentrierten Lasten P in 0,50 m Abstand symmetrisch zur Balkenmitte unterworfen.

Die vertikalen Bewegungen wurden an den Auflagern und in der Mitte beobachtet; das Auftreten von Rissen ist mit möglichster Sorgfalt an den weiss gestrichenen Balken verfolgt worden. Der verschiedenen Lagerung wegen sind im Zuggurt in Balkenmitte auf 15 cm lange Strecken, in 2,5 cm Abstand von der Aussenkante die Längenänderungen mittelst Spiegelapparaten beobachtet worden. Diese Instrumente rechts und links vom Balken wurden mittelst Rahmen und Schrauben an die Mörteloberfläche ohne Anbringen von Stiften befestigt, so dass irgend welche Schwächung des Materials dadurch vermieden wurde.

Die Ergebnisse der Versuche sind in folgender Zusammenstellung enthalten; das Auftreten der ersten Risse war schwer genau zu beobachten, nach den Durchbiegungen und Dehnungen ist es möglich, dass einzelne der angegebenen Belastungen bei den ersten Rissen etwas zu hoch sind.

Balken	Armierung in ‰ des Nutzquer- schnittes des Mörtels	Nutzhöhe des Balkens	Last P beim Auftreten der ersten Risse	Last P beim Bruch (Scheer- kraft)	Biegun- gs- moment beim Bruch in cmt	Art des Bruches
<i>Trockene Lagerung</i>						
I	1,68	12,6	0,700	2,100	104	} Ueberschreitung der Streckgrenze, Erweiterung der Zugrisse und Zerdrücken des Druckgurtes
II	2,55	12,4	1,200	2,900	144	
III	3,63	12,2	1,200	3,400	169	
IV	4,20	12,1	1,300	3,500	174	
V	4,91	12,0	1,200	3,600	179	} Gleichzeitige Ueberschreitung der Streckgrenze und Zerdrückung des Druckgurtes
<i>Feuchte Lagerung</i>						
I	1,68	12,6	1,400	2,200	109	} Ueberschreitung der Streckgrenze, Erweiterung der Zugrisse und Zerdrücken des Druckgurtes
II	2,55	12,4	1,600	2,900	144	} Ueberschreitung der Streckgrenze, sodann plötzlicher Bruch durch Abscherung auf einer Seite
III	3,63	12,2	1,800	3,400	169	} Ueberschreitung der Streckgrenze, Erweiterung der Zugrisse und Zerdrücken des Druckgurtes
IV	4,20	12,1	1,700	3,600	179	do.
V	4,91	12,0	1,600	3,900	184	} Gleichzeitige Ueberschreitung der Streckgrenze und Zerdrückung des Druckgurtes

Bei den Balken I bis IV ist deutlich die Ueberschreitung der Streckgrenze die Ursache des Bruches gewesen; die höhere Festigkeit des Mörtels auf Druck spielt bezüglich Bruchlast keine Rolle; erst bei Balken V ist die grössere Festigkeit des feucht gelagerten Mörtels deutlich zum Vorschein gekommen.

Auffallend ist die Verschiebung der Belastung beim Auftreten der ersten Risse je nach Art der Lagerung; durch das gehemmte Schwinden des Mörtels der trocken aufbewahrten Balken sind innere Span-

nungen eingetreten, welche sich zu denjenigen von der Belastung summiert haben, um die Rissbildung früher zu verursachen.

Spannungsverhältnisse beim Bruch. In ähnlicher Weise wie bei den im ersten Abschnitte behandelten Balken sind die Spannungen im Eisen und im Druckgurt ermittelt worden unter der Voraussetzung des gerissenen Zuggurtes aus Mörtel und der beim Bruch allerdings nicht mehr zutreffenden Annahme, beide Materialien seien elastisch.

Die nachfolgende Tabelle enthält die Resultate der Berechnung.

Durch Auftragung der Biegemomente, ähnlich wie dies in Abb. 5, Seite 7, geschehen ist, findet man, dass bis 4% Armierung die Biegemomente vor dem Bruch das Dreifache der Momente für die zulässige Spannung 1 t/cm² in Eisen überschreiten. Unterhalb dieser Grenze der Armierung ist die Streckgrenze im Eisen, oberhalb dieser Grenze hingegen die Druckfestigkeit des Beton für die Sicherheit der Balken massgebend.

Ein wesentlicher Unterschied in dem Sicherheitsgrad der beiden Balkenserien gegen Bruch besteht nicht; die grössere Würfel Festigkeit der feuchtgelagerten Balken hat hingegen durch die höhere Lage der Nullaxe gegen den Druckgurt wesentlich grössere Druckspannungen unmittelbar vor dem Bruche verursacht.

Das Verhältnis der Bruchspannung im Beton zur Würfel Festigkeit hat auch in beiden Serien nahezu denselben Wert erreicht.

Die *ersten Risse* sind aufgetreten unter einem Biegemoment

bei Balken	I.		II		III		IV		V	
	trocken	feucht								
von	34	69	59	79	59	89	64	84	59	79 cmt
das Verhältnis zum Biegemoment beim Bruch beträgt	0,327	0,633	0,409	0,548	0,349	0,527	0,318	0,469	0,330	0,430
die entsprechenden Spannungen im Eisen sind	1,25	2,50	1,50	1,95	1,12	1,63	1,07	1,34	0,88	1,11 t/cm ²

d. h. der höheren Festigkeit des Mörtels wegen wesentlich mehr, wie bei den früheren Versuchen mit ähnlichen Balken.

	Balken Nr.				
	I	II	III	IV	V
Armierung 4 Eisen Durchmesser	9	11	13	14	15 mm
Querschnitt der Armierung	2,54	3,80	5,31	6,16	7,07 cm ²
Nutzhöhe der Balken	12,6	12,4	12,2	12,1	12,0 cm
a) Trockene Lagerung					
Abstand der Nulllinie von der Druckgurtoberkante, $n = 10$	5,5	6,26	6,89	7,12	7,36 cm
Abstand von Zug- und Druckmittelpunkt	10,77	10,32	9,90	9,73	9,55 cm
Bruchlast	2,1	2,9	3,4	3,5	3,6 t
Biegemoment beim Bruch	104	144	169	174	179 cmt
Kraft im Eisen	9,69	13,92	17,10	17,90	18,75 t
Spannung im Eisen	3,82	3,67	3,22	2,91	2,66 t/cm ²
Druckspannung im Beton	293	372	413	420	426 kg/cm ²
Streckgrenze des Eisens	3,55	3,07	3,06	3,09	2,82 t/cm ²
Würfelfestigkeit des Beton	337	337	337	337	337 kg/cm ²
Verhältnis: $\frac{\text{Spannung im Eisen}}{\text{Streckgrenze des Eisens}}$	1,08	1,20	1,05	0,94	0,95
Verhältnis: $\frac{\text{Spannung im Beton}}{\text{Würfelfestigkeit des Beton}}$	0,87	1,10	1,22	1,25	1,26
Zur Erzielung einer 3-fachen Sicherheit gegen Bruch wäre die zulässige Eisenspannung	1,27	1,22	1,07	0,97	0,89 t/cm ²
und die zulässige Betondruckspannung	97	124	137	140	142 kg/cm ²
Effektiver Sicherheitsgrad beim Bruch, wenn σ_{eisen} $= 1$ t/cm ² massgebend	3,82	3,68	3,23	2,92	2,66
b) Feuchte Lagerung					
Abstand der Nulllinie von der Druckgurtoberkante, $n = 7,5$	4,92	5,32	5,68	5,80	5,90 cm
Abstand von Zug- und Druckmittelpunkt	10,96	10,63	10,31	10,17	10,03 cm
Bruchlast	2,2	2,9	3,4	3,6	3,7 t
Biegemoment beim Bruch	109	144	169	179	184 cmt
Kraft im Eisen	9,97	13,52	16,40	17,60	18,30 t
Spannung im Eisen	3,94	3,56	3,09	2,86	2,59 t/cm ²
Druckspannung im Beton	338	425	482	507	519 kg/cm ²
Streckgrenze des Eisens	3,55	3,07	3,06	3,09	2,82 t/cm ²
Würfelfestigkeit des Eisens	410	410	410	410	410 kg/cm ²
Verhältnis: $\frac{\text{Spannung im Eisen}}{\text{Streckgrenze des Eisens}}$	1,11	1,16	1,01	0,93	0,92
Verhältnis: $\frac{\text{Spannung im Beton}}{\text{Würfelfestigkeit des Beton}}$	0,83	1,04	1,18	1,24	1,27
Zur Erzielung einer 3-fachen Sicherheit gegen Bruch wäre die zulässige Eisenspannung	1,31	1,19	1,03	0,95	0,86 t/cm ²
und die zulässige Betondruckspannung	112	141	161	169	173 kg/cm ²
Effektiver Sicherheitsgrad beim Bruch, wenn σ_{eisen} $= 1$ t/cm ² massgebend	3,94	3,57	3,09	2,86	2,60

Die Messung der *Dehnungen im Zuggurt*, 2,5 cm weit von der äusseren Kante, hat nur Wert innerhalb der Mitwirkung des Beton, d. h. vor Auftreten von Rissen. Zur Veranschaulichung sind die Längenänderungen, gemessen auf 15 cm Messstrecke und in mm auf 1 m umgerechnet, auf beiliegenden Abbildungen 2 und 3 durch Kurven dargestellt; als Abscissen sind die Belastungen pro Presse, als Ordinaten die Dehnungen aufgetragen.

Die Dehnungen im Zuggurt in mm/m, 2,5 cm weit von Balken-Aussenkante.

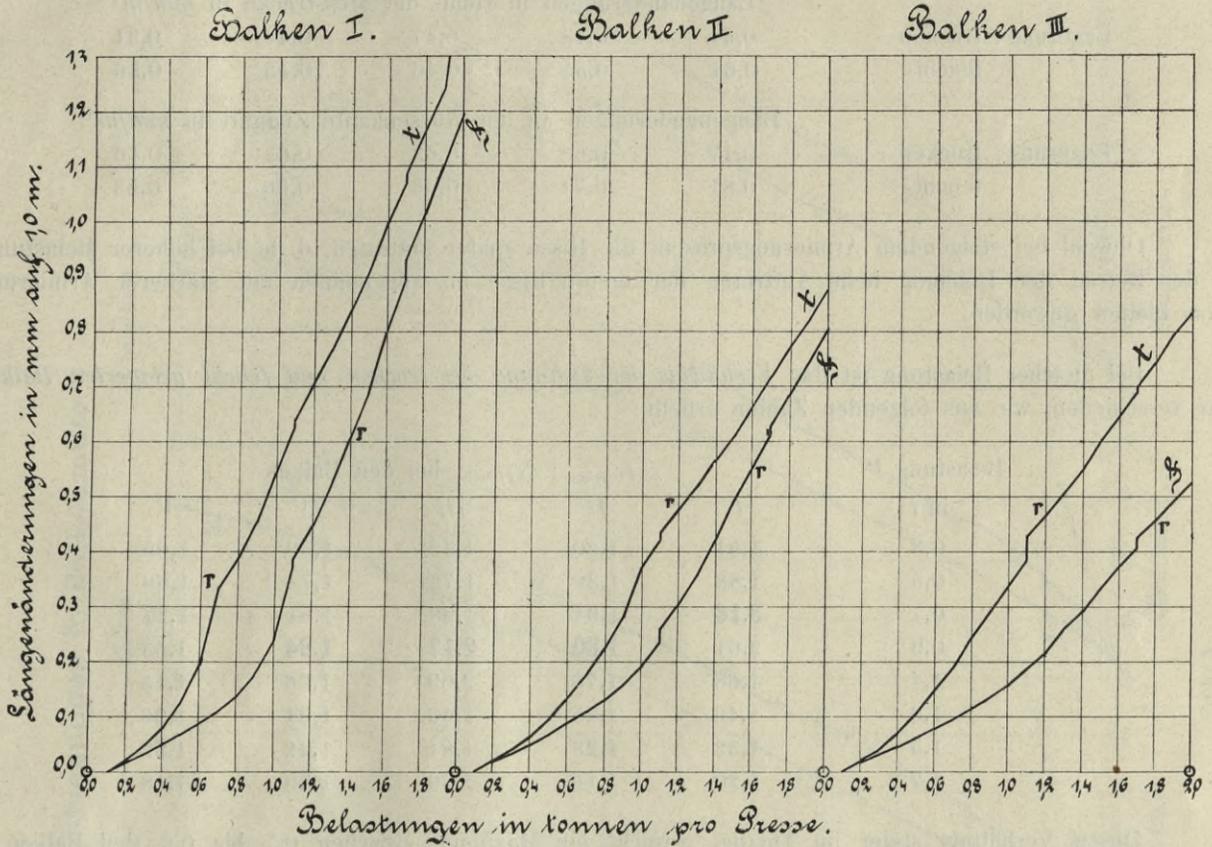


Abb. 2

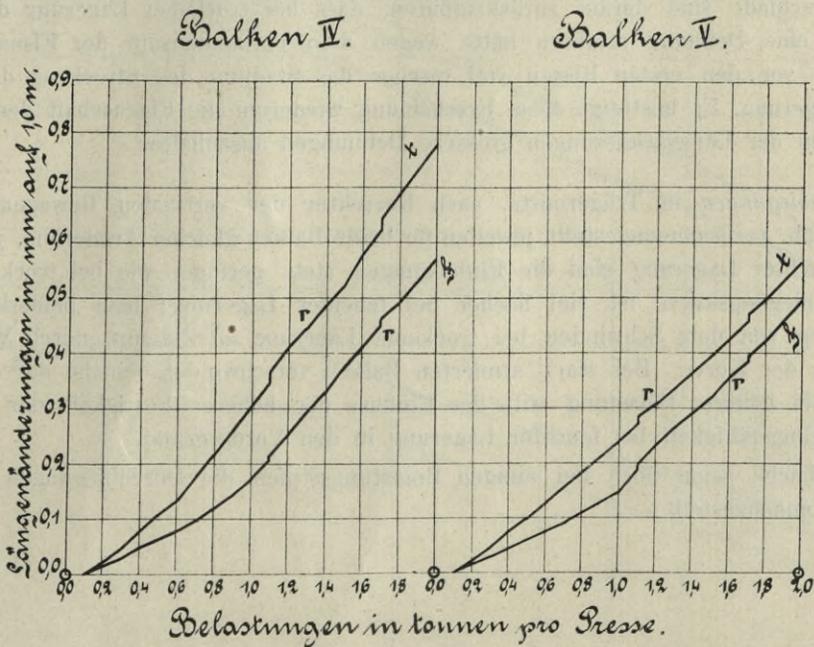


Abb. 3

Bei feuchter Lagerung (f) sind die Dehnungen durchgehend grösser, wie bei trockener Lagerung (t). Am wichtigsten sind die beim Auftreten der ersten Risse am Balken (auf der Messtrecke traten sie nur später ein) beobachteten Längenänderungen; diese Werte wurden hiernach wiedergegeben in der Höhe der effektiven Messtrecke, sodann vergrössert im Verhältnis des Abstandes der äussersten Kante des Zuggurtes zu dem Abstände der Messtrecke von der Nullaxe.

Balken	I	II	III	IV	V
	Längenänderungen in Höhe der Messtrecke in mm/m^1				
Lagerung: trocken	0,34	0,48	0,47	0,44	0,31
feucht	0,61	0,55	0,46	0,45	0,36
	Längenänderungen an der Aussenkante Zuggurt in mm/m^1				
Lagerung: trocken	0,47	0,68	0,63	0,65	0,46
feucht	0,81	0,74	0,63	0,66	0,53

Obwohl bei steigendem Armierungsprozent die Risse später auftraten, d. h. bei höherer Belastung, ist der Betrag der Dehnung beim Auftreten der ersten Risse im allgemeinen mit stärkerer Armierung etwas kleiner geworden.

Bei gleicher Belastung ist das *Verhältnis der Dehnung bei trocken und feucht gelagerten Balken* sehr verschieden, wie aus folgenden Zahlen erhellt:

Belastung P in t	$\Delta l_{\text{trocken}} : \Delta l_{\text{feucht}}$ bei den Balken				
	I	II	III	IV	V
0,3	1,51	1,20	1,32	1,59	1,65
0,5	1,88	1,39	1,72	1,74	1,68
0,7	3,14	1,64	1,98	1,81	1,77
0,9	2,61	1,80	2,17	1,84	1,63
1,1	1,68	1,78	2,09	1,66	1,45
1,3	1,46	1,45	1,96	1,51	1,26
1,5	1,32	1,23	1,81	1,42	1,22
1,7	1,20	1,18	1,69	1,39	1,18

Dieses Verhältnis steigt im Anfang, erreicht ein Maximum zwischen 0,7 bis 0,9 (bei Balken II 1,96 für $P = 1^t$), um nachher wiederum kleinere Werte anzunehmen.

Die Unterschiede sind darauf zurückzuführen, dass bei trockener Lagerung der Beton durch das Schwinden bereits eine Dehnung erfahren hatte wegen dem Vorhandensein der Eiseneinlagen, somit die ersten Belastungen vor den ersten Rissen viel rascher das Stadium des Streckens des Beton erreichten wie bei feuchter Lagerung. Es bestätigt diese Erscheinung wiederum die Eigenschaft des Beton und Mörtels, durch Vorhandensein der Längsarmierungen grössere Dehnungen auszuhalten.

Die *Durchbiegungen* in Trägermitte, nach Korrektur der vertikalen Bewegung an den Auflagern, sind in Abb. 4 zusammengestellt jeweils für beide Balken gleicher Armierung, jedoch verschiedener Lagerung. Bei feuchter Lagerung sind die Einbiegungen stets geringer wie bei trockener Lagerung; der Beginn der Durchbiegungskurve ist viel flacher bei feuchter Lagerung; man bemerkt den Einfluss der inneren Spannungen von dem Schwinden bei trockener Lagerung im Zuggurt durch Verkürzung des flach steigenden Zweiges der Kurve. Bei stark armierten Balken verschwindet beinahe der erste flach steigende Teil der Kurve. Bei höherer Belastung tritt der Einfluss der höheren Festigkeit des Mörtels und seiner geringeren Verkürzungsfähigkeit bei feuchter Lagerung in den Vordergrund.

Zum Vergleiche seien noch bei einigen Belastungsstufen die Durchbiegungen der beiden Balkenserien in mm zusammengestellt:

Die Durchbiegungen in Balkenmitte.

— = total — = bleibend = berechnet

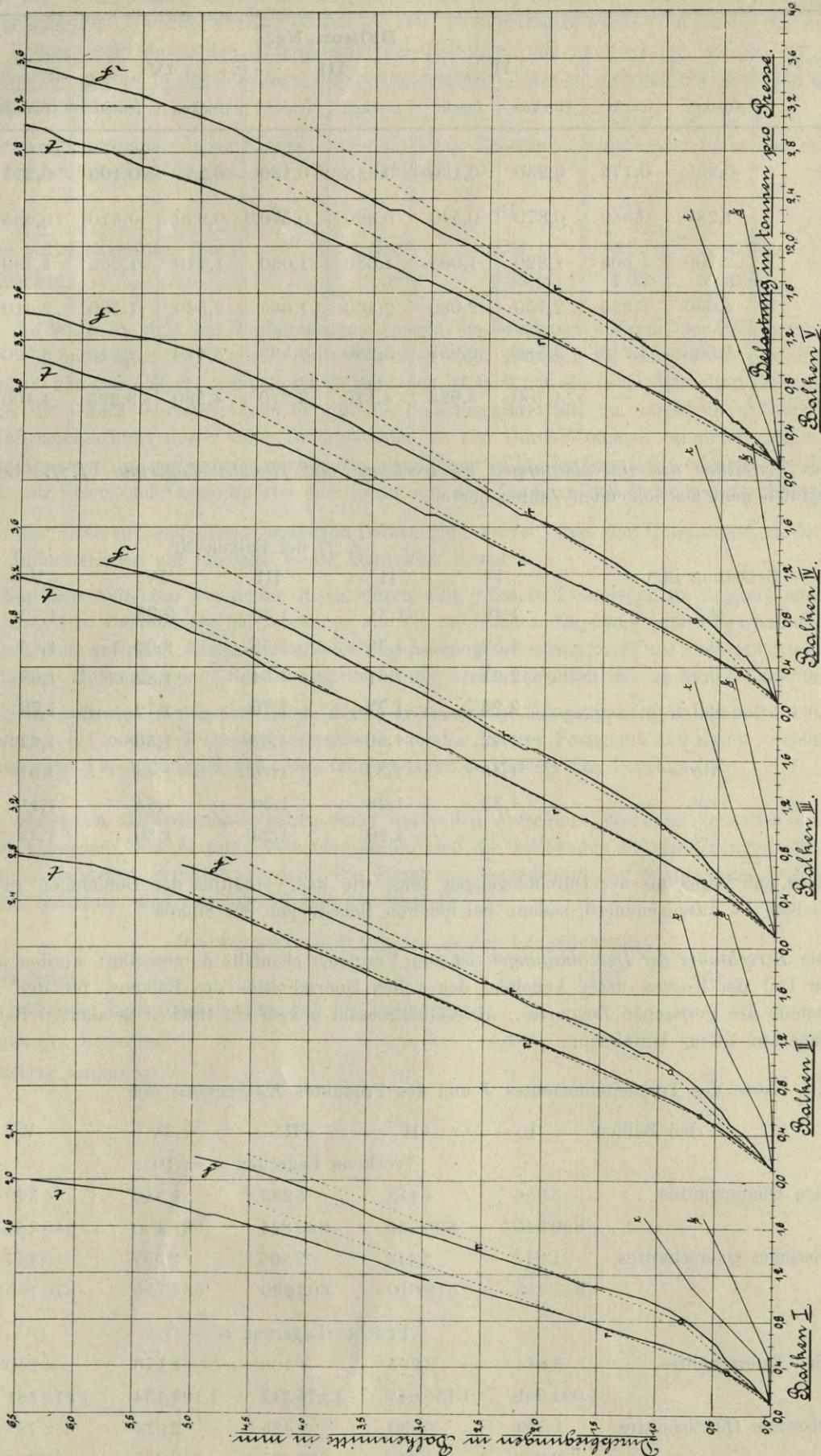


Abb. 4

Durchbiegungen in Balkenmitte in mm.

Belastung pro Presse in t	Balken Nr.									
	I		II		III		IV		V	
	trocken	feucht	trocken	feucht	trocken	feucht	trocken	feucht	trocken	feucht
0,3	0,255	0,175	0,230	0,160	0,235	0,180	0,235	0,100	0,275	0,160
0,7	1,280	0,580	0,870	0,540	0,880	0,570	0,930	0,510	0,985	0,585
1,1	2,700	1,505	1,820	1,085	1,630	1,030	1,710	1,065	1,780	1,090
1,5	4,060	2,825	2,750	2,080	2,460	1,685	2,560	1,780	2,610	1,735
1,9	5,600	4,210	3,785	2,955	3,280	2,535	3,410	2,545	3,520	2,510
2,3	—	—	4,700	3,925	4,110	3,340	4,290	3,295	4,400	3,270

Das *Verhältnis der Durchbiegungen bei trockener und feuchter Lagerung* ($f_t : f_f$) bei einzelnen Belastungsstufen geht aus folgenden Zahlen hervor:

Belastung in t	$f_t : f_f$ bei Balken Nr.				
	I	II	III	IV	V
0,3	1,46	1,31	1,30	2,35	1,72
0,5	1,52	1,35	1,35	2,02	1,66
0,7	2,21	1,61	1,54	1,82	1,68
0,9	2,24	1,77	1,70	1,79	1,76
1,1	1,72	1,60	1,63	1,56	1,62
1,5	1,43	1,32	1,46	1,44	1,51
1,9	1,33	1,28	1,30	1,34	1,41
2,3	—	1,20	1,23	1,30	1,35

Auch das Verhältnis der Durchbiegungen zeigt wie das Verhältnis der Dehnungen zu Beginn ein Steigen (Balken IV ausgenommen), sodann bei höheren Belastungen ein Sinken.

Die *Berechnung der Durchbiegungen* ist zum Vergleich ebenfalls durchgeführt worden und zwar für den ersten Teil der Kurven unter Annahme des vollen Querschnittes des Balkens, für den zweiten Teil unter Annahme des gerissenen Zuggurtes. Als Verhältniszahl n kam bei trocken gelagerten Balken 10, bei feucht gelagerten 7,5 in Anwendung.

Als Werte des Trägheitsmomentes J und des Produktes EJ ergaben sich

	bei Balken				
	I	II	III	IV	V
	Trockene Lagerung $n = 10$				
J des vollen Querschnittes	3 956	4 143	4 283	4 340	4 399 cm ⁴
$EJ =$	850 540	890 745	920 845	933 100	945 785 cm ⁴ . cm ² /t
J des gerissenen Querschnittes	1 943	2 414	2 806	2 957	3 117 cm ⁴
$EJ =$	417 745	519 010	603 290	635 755	670 155 cm ⁴ . cm ² /t
	Feuchte Lagerung $n = 7,5$				
J des vollen Querschnittes	3 844	3 965	4 100	4 176	4 240 cm ⁴
$EJ =$	1 091 959	1 136 647	1 175 347	1 197 134	1 215 481 cm ⁴ . cm ² /t
J des gerissenen Querschnittes	1 579	2 030	2 425	2 614	2 794 cm ⁴
$EJ =$	452 652	581 940	695 175	749 355	800 956

Die aus diesen Zahlen ermittelten Durchbiegungen geben für jeden Balken und jede Lagerungsart eine Durchbiegungslinie, welche strichpunktiert in Abb. 4 eingetragen wurde; die Linie für vollen Querschnitt des Balkens geht durch den Anfangspunkt der Belastung, die zweite Linie, welche dem gerissenen Zuggurt entspricht, wurde in der Abbildung derart angeschlossen, dass sie sich den effektiven Durchbiegungen möglichst gut anpasse.

Der Kreuzungspunkt dieser Linien entspricht einer Belastung, welche viel tiefer wie diejenige bei der ersten Rissbildung liegt und folgende Werte beträgt:

	Balken	I	II	III	IV	V
Trockene Lagerung, Kreuzung für $P =$		0,37	0,57	0,58	0,36	0,15 t
Feuchte Lagerung, „ „ =		0,80	0,95	1,05	0,80	0,67 t

Da die Werte n nicht aus Verkürzungsmessungen am Druckgurt während der Belastung der Balken, sondern aus Feinmessungen an Prismen ermittelt worden sind, stimmen die berechneten und die effektiven Durchbiegungen nur angenähert; mit höheren Belastungen ist auch das elastische Verhalten nicht proportional. Der Vergleich ist jedoch lehrreich, denn er gibt die Belastungsintervalle an, innerhalb welchen im Anfang der volle Balkenquerschnitt durch seine Deformationen an den Durchbiegungen teilnimmt und nachher der Balken unter Annahme des gerissenen Querschnittes des Zuggurtes bei bestimmtem Verhältnis der Elastizitätskoeffizienten von Eisen und Cementmörtel sich linear mit der Zunahme der Belastung durchbiegt.

Aus der Untersuchung dieser armierten Balken geht hervor, dass der Unterschied in der Lagerung sich in den Deformationen auf folgende Weise bemerkbar macht:

1. Vor dem Auftreten der ersten Risse, durch weit grössere Dehnungen im Zuggurt und Durchbiegungen in Balkenmitte bei trockener als wie bei feuchter Lagerung; diese Erscheinungen hängen mit dem Auftreten namhafter initialer Zugspannungen des Zuggurtes aus Cementmörtel zusammen, infolge Hemmen seiner Schwindung durch die Armierungseisen bei trockener Lagerung.
2. Nach Auftreten der ersten Risse, durch grössere Durchbiegungen in Balkenmitte bei trockener als wie bei feuchter Lagerung, herrührend von der höheren Festigkeit und damit verbundenen geringeren Verkürzungsfähigkeit des feuchtgelagerten Mörtels des Druckgurtes.

Die *bleibenden Deformationen* geben einen wertvollen Aufschluss über das Verhalten des Beton je nach Art der Lagerung. Für einzelne Belastungsstufen sind die bleibenden Formänderungen durch Zurückgehen auf die Anfangslast ermittelt worden. Die Resultate, ausgedrückt in Prozenten der Deformation bei der erreichten Laststufe, sind nachfolgend zusammengestellt:

Druckversuche mit Prismen in der Längsrichtung

Max. Beanspruchung	37	70	103	137	170 kg/cm ²
Bleibende Verkürzung beim Zurückgehen auf die Anfangslast:					
bei trockener Lagerung	3,5	4,7	6,9	9,7	12,0 %
bei feuchter Lagerung	0	0	1,1	1,9	3,2 %

Biegeversuche an armierten Balken.

Max. Belastung pro Presse in t	Bleibende Deformationen beim Zurückgehen auf die Anfangslast									
	Balken I		Balken II		Balken III		Balken IV		Balken V	
	trocken	feucht	trocken	feucht	trocken	feucht	trocken	feucht	trocken	feucht
<i>Bleibende Dehnungen im Zuggurt des armierten Balkens</i>										
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0,5	29,8	5,4	26,0	14,6	28,1	8,2	23,1	5,3	26,0	8,8
1,1	35,0	20,3	35,7	17,1	(?)	10,3	27,0	9,4	28,3	8,0
1,7	27,7	15,0	28,7	15,4	26,2	14,1	23,0	12,2	23,2	10,2
2,3	—	—	—	13,4	17,2	27,6	19,7	11,0	20,4	9,6
<i>Bleibende Durchbiegungen in Balkenmitte</i>										
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0,5	16,7	3,8	14,4	2,7	22,8	9,2	15,4	0	21,8	12,6
1,1	24,8	17,8	23,7	4,1	20,8	8,3	18,8	3,1	19,8	10,8
1,7	23,0	16,3	21,4	9,1	18,5	10,2	16,8	7,0	18,4	9,7
2,3	—	—	—	9,9	17,6	10,8	16,5	7,0	17,6	10,3

Ein Vergleich der Werte der Tabelle mit denjenigen aus den Messungen an Prismen lässt erkennen, dass nur die dem armierten Beton eigentümliche Dehnungsfähigkeit, verbunden mit den inneren durch das Schwinden verursachten Spannungen, so bedeutende Unterschiede in den bleibenden Deformationen je nach Art der Lagerung erklären kann.



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



IV-301078

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



IV-301079

POLITECHNIKA KRAKOWSKA
BIBLIOTEKA GŁÓWNA

L. inw.

18317

524. 13. IX. 54

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



IV-301080

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315558

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315559

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000315560

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000300969