

論 說 報 告

土木學會誌 第十三卷第一號 昭和二年二月

VERDREHUNGSVERSUCHE MIT UNBEWEHRTEN UND BEWEHRTEN BETONKÖRPERN

Von Takenosuke Miyamoto, Mitglied.

HAUPTSACHE

Dieser Bericht ist die Veröffentlichung der Versuchsergebnisse der auf Torsion beanspruchten Betonkörper im runden Querschnitt mit bzw. ohne Bewehrung, durchgeführt im Laboratorium des Bauingenieurwesens im Ministerium des Innern, Tokio, unter dem Arbeitsplan und der Hauptanleitung des Verfassers, und ausschliesslich eine Fortsetzung seines vorhergehenden Werkes.¹⁾

Es handelt sich hauptsächlich um:

- 1) Spannungsverteilung in der Querschnittsfläche beim Bruch von Betonkörpern ohne Bewehrung.
- 2) Schubelastizitätsmodul des Betons, und
- 3) Einfluss der verschiedenen Bewehrungsarten auf die Widerstandsfähigkeit gegen Verdrehung von Beton.

INHALTSVERZEICHNIS.

	Seite
Erster Abschnitt. Einleitung.	3
1. Vorbemerkungen.	3
2. Beschaffenheit der Aufgabe.	5
3. Arbeitsplan.	6
Zweiter Abschnitt. Bauart der Versuchskörper.	8
4. Versuchskörper für Verdrehung.	8
5. Eisenmenge in Versuchskörpern.	9
6. Körper für Zug-, Druck- und Scherversuche.	9
Dritter Abschnitt. Baustoffe der Versuchskörper.	10
7. Zement.	10
8. Zuschlagstoffe.	11

1) "Widerstandsfähigkeit der Materialien gegen Verdrehung mit besonderer Rücksicht auf diejenige von Eisenbeton", veröffentlicht in der Zeitschrift des Vereines der Bauingenieure, S. 661-845; und S. 1273-1420, 1925, Tokio.

9.	Anmachwasser.	11
10.	Zusammensetzung des Betons.	12
11.	Armierungseisen.	12
Vierter Abschnitt. Herstellung der Versuchskörper.		12
12.	Form für Torsionskörper.	12
13.	Vorbereitung des Eisens.	13
14.	Mischung des Betons.	13
15.	Konsistenz oder Flüssigkeit der Mischung.	14
16.	Betonierung.	15
17.	Lagerung der Versuchskörper.	15
Fünfter Abschnitt. Durchführung der Versuche.		15
18.	Versuchsordnung.	15
19.	Torsionsmaschine.	16
20.	Verfahren der Belastung.	17
Sechster Abschnitt. Festigkeiten des Betons.		17
21.	Druckfestigkeit.	17
22.	Zugfestigkeit.	18
23.	Scherfestigkeit.	18
Siebenter Abschnitt. Versuchsergebnisse mit unbewehrten Körpern.		19
24.	Vorversuche.	19
25.	Hauptversuche.	20
Achter Abschnitt. Versuchsergebnisse mit Körpern in Gruppe A.		21
26.	Körper in Reihe 2.	21
27.	Körper in Reihe 3.	21
28.	Körper in Reihe 4.	22
29.	Übersicht von Gruppe A.	22
Neunter Abschnitt. Versuchsergebnisse mit Körpern in Gruppe B.		24
30.	Körper in Reihe 5.	24
31.	Körper in Reihe 6.	24
32.	Körper in Reihe 7.	25
33.	Körper in Reihe 8.	25
34.	Körper in Reihe 9.	26
35.	Übersicht von Gruppe B.	26
Zehnter Abschnitt. Versuchsergebnisse mit Körpern in Gruppe C.		27
36.	Körper in Reihe 10.	27

37. Körper in Reihe 11.	28
38. Körper in Reihe 12.	28
39. Übersicht von Gruppe C.	29
Elfter Abschnitt: Verdrehungswinkel.	30
40. Verdrehung der unbewehrten Körper.	30
41. Verdrehung der bewehrten Körper.	31
42. Einfluss der Bewehrung auf Verdrehung.	35
Zwölfter Abschnitt: Statische Auswertung der Ergebnisse.	36
43. Verteilung der Schubspannungen.	36
44. Schubelastizität des Betons.	39
45. Rissbildungsmoment.	40
46. Bruchmoment.	45
47. Schluss.	46
Dreizehnter Abschnitt: Nachtrag.	48
48. Druckversuche der Torsionskörper.	48
49. Berechnung der Schraubenpfähle.	50

Erster Abschnitt. Einleitung.

1. Vorbemerkungen.

Wie im vorigen Werk¹⁾ des Verfassers eingeleitet, sind die Verdrehungstheorien der Körper mit verschiedenen Querschnitten, wie, z. B. kreisförmig, kreisringförmig, elliptisch, quadratisch, rechteckig, dreieckig, sechseckig, achteckig usw. von Navier, Poisson, Cauchy, Saint-Venant, Wertheim, Grashof, Hermann, Föppl, Henneberg, Prandtl, Weber und anderen seit dem Anfang des vorigen Jahrhunderts veröffentlicht worden, und seitdem sind die Versuche über die Widerstandsfähigkeit und die Formänderung der stabförmigen Körper gegen Verdrehung hergestellt aus Gusseisen, Hartblei, Flusseisen, und Stahl von mehreren Mechanikern durchgeführt worden. Alle diese Veröffentlichungen dienen zur Klärung dieses schwierigen, aber interessanten Problems.

Jedoch sind die Torsionsversuche mit Beton und Eisenbeton bis vor kurzem vernachlässigt worden, weil die auf Torsion beanspruchten Bauteile ganz selten in wirklichen Eisenbetonkonstruktionen vorkommen, und ihre

1) s. die Fußbemerkung von S. 1.

Geschichte ist selbstverständlich neu und kurz. Die bis jetzt ausgeführten Torsionsversuche mit Beton und Eisenbeton sollen hier wieder aufgezählt werden :

- 1) Versuche von E. Mörsch, Stuttgart, 1903;¹⁾
- 2) Versuche von Mesnager und Mercier, Paris, 1903;²⁾
- 3) Versuche von C. Bach und O. Graf, Stuttgart, 1911;³⁾
- 4) Versuche von A. Föppl, München, 1911;⁴⁾
- 5) Versuche von C. R. Young und anderen, Toronto, Kanada, 1911;⁵⁾
- 6) Versuche von O. Graf und E. Mörsch (statische Auswertung der Ergebnisse), Stuttgart, 1921;⁶⁾

Man findet die von den oben angeführten Versuchen gelieferten Ergebnisse sehr lehrreich und wertvoll, und gebührt diesen Ausführern das höchste Verdienst, dass das Problem in Klarheit gebracht wurde, während die ganzen wissenschaftlichen Kreise davon keine oder die geringste Kenntnis gehabt hatten, obgleich einige unter diesen Versuchen wenigstens als unvollkommen beurteilt werden müssen.

Prof. Dr. Ing. E. Mörsch geht in der Forschungslinie der Torsion mit Beton- und Eisenbetonkörpern voran, und unter allen anderen können die in der Materialprüfungsanstalt der technischen Hochschule Stuttgart durchgeführten, aufeinander folgenden zahlreichen Versuche einen Ruhm von der höchsten Vollkommenheit und von dem grössten Wert fordern.

Die im folgenden zu berichtenden Versuche sind von Verfasser geplant worden, zum Zweck, den Stuttgarter Versuchen nachzufolgen, dieselben zur Klärung des Problems vollzubringen, und in Laboratorium des Bauingenieurwesens im Ministerium des Innern, durchzuführen, unter der Unterstützung und der Zusammenwirkung seiner Kollegen : Dr. Ing. K. Nakagawa, Direktor des Bureaus der öffentlichen Arbeiten, Tokio, im Ministerium des Innern ; Dr. Ing. N. Mononobe, Direktor des Laboratoriums des Bauingenieur-

1) "Schub- und Scherfestigkeit des Betons", Schweizerische Bauzeitung, S. 295 u. f. 1904.

2) Expériences, rapports et propositions. Instructions ministérielles relatives à l'emploi du béton armé, Paris, 1906.

3) "Widerstandsfähigkeit von Beton und Eisenbeton gegen Verdrehung," Veröffentlichungen des deutschen Ausschusses für Eisenbeton, Heft 16, 1912.

4) "Verdrehungsversuche mit Wellen aus Eisenbeton", Mitteilungen aus dem mechanisch-technischen Laboratorium der technischen Hochschule München, Heft 32, 1912.

5) "Torsional Strength of Rectangular Sections of Concrete, Plain and Reinforced", Bulletin of University of Toronto, No. 3, Section No. 9, 1912.

6) "Verdrehungsversuche zur Klärung der Schubfestigkeit von Eisenbeton", Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Heft 258, 1922.

wesens; Herr A. Awoyama, Verantwortlicher Ingenieur im Flussregulierungsamt des Ara; Herr S. Kanamori, Verantwortlicher Ingenieur im Flussregulierungsamt des Tama; und andere Ingenieure im Laboratorium.

2. Beschaffenheit der Aufgabe.

Wie bereits bemerkt, findet die Beanspruchung auf Torsion selten in den Eisenbetonkonstruktionen statt, und sie kann meist durch konstruktive Massnahmen vermieden werden. Das Problem der Torsionsbeanspruchung des Betons ist daher tatsächlich von geringerer Wichtigkeit, als es bei der Biegungs- bzw. Druckbeanspruchung der Fall ist, woraus man auf die Tatsache kommt, dass dieses Problem lange unbeachtet gelassen wurde. Aber die Torsionsbeanspruchung kommt nicht allein im Falle der Eisenbetonschraubenpfähle vor, sondern muss ihr Eintritt auch als Nebenspannungen in alle Bauteile unvermiedlich sein. Nun ist das Torsionsproblem von Eisenbeton ein Aufmerksamkeit erregender, interessanter Forschungsgegenstand geworden, der noch viele gelassene, unklare Punkte besitzt.

Aus den übereinstimmenden Ergebnissen früherer Versuche kann man ohne weiteres auf die Erscheinungen und die Eigenschaften der Torsionsbeanspruchung von Beton mit bzw. ohne Eiseneinlagen wie im folgenden angeführt, schliessen:

1) Das Eintreten der Risse sowie der Bruch aller Betonkörper mit bzw. ohne Bewehrung entsteht in der unter 45° geneigten Schraubenlinie.

2) Bei unbewehrten Körpern kann das Bruchmoment nicht merklich über das Rissbildungsmoment ansteigen, so dass der erste Riss ein Zeichen des gleichzukommenden Bruches ist, oder der Bruch kommt gleichzeitig mit dem ersten Riss:

3) Allein mit Längseisen oder Querringen bewehrte Körper wären durch beinahe gleich hohe Momente wie bei unbewehrten Betonkörpern gebrochen. Man kann in solchen Fällen keinen günstigen Einfluss der Eiseneinlagen bemerken.

4) Die geneigten Längseisen können das Bruchmoment einigermaßen über dasjenige bei unbewehrten Betonkörpern erhöhen.

5) Mit sowohl Längseisen als auch Ringen bewehrte Körper verzögern den Beginn der Rissbildung, und dabei nimmt das Bruchmoment viel höher als das Rissbildungsmoment zu.

6) Wenn die Betonkörper mit Spiralen bewehrt werden, die unter 45° so

ansteigen, dass sie beim ausgeübten Torsionsmoment den auf Zug beanspruchten Beton entlasten, ist der Einfluss der Eiseneinlagen am grössten. Das Rissbildungs- bzw. Bruchmoment wird beträchtlich erhöht.

7) Bei Körpern, hergestellt aus spröden Materialien wie Beton, findet der Bruch infolge der schiefen, unter 45° gerichteten Hauptzugspannungen statt.

8) Aus den Versuchsergebnissen pflegt man die höchsten Schubspannungen im Querschnitt auszurechnen, die gewöhnlichen, theoretischen Formeln benützend, die allein für die vollkommen elastischen Körper gebräuchlich sind. Diese Spannungen sind gewöhnlich als die Verdrehungsfestigkeit vorgestellt, aber sie sind ganz anders als die oben erwähnten Hauptzugspannungen, auf die der Bruch zurückzuführen ist. Alle Versuche bei Vollzylindern zeigen ganz übereinstimmend die aus dieser Weise gerechnete Verdrehungsfestigkeit bedeutend höher als die Zugfestigkeit des Betons.

9) Das Verhältnis dieser Verdrehungsfestigkeit zur Zugfestigkeit ist beim Vollzylinder viel grösser als beim Hohlzylinder. Diese Tatsache steht in der genauen Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen bei Gusseisenkörpern.

10) Der Torsionswinkel wird nicht merklich durch Eiseneinlagen beeinflusst.

Diese Erkenntnisse liefern zur praktischen Eisenbetonkonstruktion sowie zukünftigen Untersuchung in diesem Gebiete eine richtige Anleitung.

3. Arbeitsplan.

Es erscheint jetzt dem Verfasser als überflüssig und nicht nötig, die gleichartigen Versuche zu wiederholen, wie die früheren, um nochmals von den gewonnenen Ergebnissen zu überzeugen. Man soll vielmehr einen Forschungsschritt in die ungeöffneten Gegenden machen. Das Saint-Venantsche Problem, nach Clebsch,¹⁾ ist allein für die theoretisch elastischen Körper gelöst worden, bei Körpern aus Materialien wie Beton ist es aber nicht lösbar, und ist dazu eine weitere Untersuchung notwendig. Unter solehem Umstand ist der Körper mit quadratischem oder rechteckigem Querschnitt für die genaue Rechnung sowie die zuverlässige Gleichung ungeeignet.

Der Verfasser zog deshalb bei den Plänen zu diesen Versuchen die kreisförmigen Beton- und Eisenbetonkörper vor, bei denen der Einfluss der in verschiedenen Formen eingelegten Eisen, meist der Spiralen verschiedener Schraubenwinkel, auf den Torsionswiderstand, sowie das Gesetz von der Bruch-

1) Clebsch: Theorie der Elastizität der festen Körper, 1862, S. 74.

spannungsverteilung im Querschnitt der Betonkörper klar zum Ausdruck gebracht werden musste. Nochmals betont, beziehen sich diese Versuche hauptsächlich auf:

1) Torsionswiderstand der Körper ohne Eiseneinlagen. Dieser ist unbedingt notwendig für die Gleichung mit demjenigen bei bewehrten Körpern; und ferner dient er zur Feststellung des Verteilungsgesetzes der Schubspannungen im Querschnitt.

2) Torsionswiderstand der Körper, die ausser einigen Ausnahmen mit Spiralen verschiedener Schraubenwinkel bewehrt sind. Der grösste Einfluss der unter 45° gerichteten Spiralen ist übereinstimmend bestätigt worden, darum soll hier die Wirkungsveränderung der Spiralen zu Folge der Verschiedenheit des Schraubenwinkels untersucht werden.

Damit ausreichende zuverlässige Versuchsergebnisse erwartet werden können, sollen die Querschnittsabmessungen und die Zahl der Probekörper so gross wie möglich bestimmt werden. Insbesondere für die Körper aus ungleichartigem Stoff wie Beton muss diese Bemerkung sorgsam befolgt werden.

Bei früheren Versuchen sind die Probekörper von verschiedenen Querschnittsformen, Abmessungen und Zahlen, wie niedergelegt im folgenden, wirklich aufgenommen worden:

Zusammenstellung 1. Frühere Versuche

Ausführer	Querschnitte	Abmessungen (cm)	Bewehrung	Zahl	
E. Mörsch	{	kreisförmig	26 ϕ	{ unbewehrt Spiralen	8
		kreisringförmig	26 u. 16,2 ϕ		
Mesnager	{	kreisförmig	10,7 ϕ	{ unbewehrt Längseisen	2
		kreisförmig	40 ϕ		
C. Bach u. O. Graf	{	kreisringförmig	40 u. 25 ϕ	{ Längseisen Längseisen u. Ringe Längseisen u. Spiralen	37
		quadratisch	30 \times 30		
		rechteckig	42 \times 21		
A. Föppl	{	kreisförmig	10 ϕ	{ unbewehrt Längseisen	15
		quadratisch	12,7 \times 12,7		
C. R. Young	{	rechteckig	12,7 \times 19,05	{ unbewehrt Längseisen Längseisen u. Spiralen	12
		rechteckig	12,7 \times 25,4		
		rechteckig	12,7 \times 25,4		
O. Graf u. E. Mörsch	{	kreisförmig	40 ϕ	{ unbewehrt Längseisen Ringe Längseisen u. Ringe Spiralen	17
		kreisringförmig	40 u. 25 ϕ		
		kreisringförmig	40 u. 25 ϕ		

Bei den gegenwärtigen Versuchen, wurden für den oben erwähnten, ersten Forschungszweck 16 unbewehrte, kreisförmige Körper verschafft, worunter 4 Körper als Vorversuche zuerst auf Torsion beansprucht werden sollten. Für den zweiten Forschungszweck wurden 79 kreisförmige Körper verschafft, die in 11 verschiedenen Arten bewehrt wurden, und bei denen je 8 Körper in der Regel eine gleiche Bewehrungsform besitzen.

Damit auch die Festigkeitseigenschaften des verwandten Betons geklärt werden konnten, wurden 12 Körper für Zugversuche, 6 Körper für Druckversuche, und 6 Körper für Scherversuche, aus dem gleichen Beton wie für Torsionskörper hergestellt.

Zweiter Abschnitt. Bauart der Versuchskörper.

4. Versuchskörper für Verdrehung.

Es wurden hergestellt:

- Reihe 1. 16 Körper nach Abb. 1, mit kreisförmigem Querschnitt ohne Eiseneinlagen;
- Gruppe A: Reihe 2. 8 Körper nach Abb. 2, mit kreisförmigem Querschnitt wie in Abb. 1, jedoch mit 7 Spiralen aus 6.35 mm starkem Rundei- sen, wobei der Schraubenwinkel $\beta=45^\circ$;
- Reihe 3. 8 Körper nach Abb. 3, mit 5 Spiralen aus 6.35 mm starkem Rundei- sen, wobei der Schraubenwinkel $\beta=60^\circ$;
- Reihe 4. 8 Körper nach Abb. 4, mit 9 Spiralen aus 6.35 mm starkem Rundei- sen, wobei der Schraubenwinkel $\beta=30^\circ$;
- Gruppe B: Reihe 5. 8 Körper nach Abb. 5, mit 7 Spiralen, deren Schraub- enwinkel $\beta=45^\circ$, und 10 Längseisen, beide 6.35 mm stark;
- Reihe 6. 8 Körper nach Abb. 6, mit 7 Spiralen, deren Schraubenwinkel $\beta=45^\circ$, und 18 Ringen, beide 6.35 mm stark;
- Reihe 7. 8 Körper nach Abb. 7, mit 5 Spiralen, deren Schraubenwinkel $\beta=60^\circ$, und 10 Längseisen, beide 6.35 mm stark;
- Reihe 8. 8 Körper nach Abb. 8, mit 9 Spiralen, deren Schraubenwinkel $\beta=30^\circ$, und 18 Ringen, beide 6.35 mm stark;
- Reihe 9. 8 Körper nach Abb. 9, mit 10 Längseisen und 18 Ringen, alle beide 6.35 mm stark;
- Gruppe C: Reihe 10. 8 Körper nach Abb. 10, mit sowohl 7 äusseren als auch 5 inneren Spiralen, alle beide aus 6.35 mm starkem Rundei- sen und

$$\beta = 45^\circ;$$

Reihe 11. 6 Körper mit 7 äusseren und 5 inneren Spiralen aus 6.35 mm starkem Rundeisen wie bei Reihe 10, mit der Verschiedenheit, dass die äusseren und inneren Spiralen durch je 6 hinzugefügte 6.35 mm starke Längseisen verstärkt wurden;

Reihe 12. 1 Körper mit 5 inneren Spiralen aus 6.35 mm starkem Rundeisen allein, durch 6 hinzugefügte 6.35 mm starke Längseisen verstärkt, ebenso wie bei Reihe 11.

5. Eisenmenge in Versuchskörpern.

Damit die Wirksamkeit verschiedenartiger Eiseneinlagen in klare unmittelbare Gleichung gebracht werden konnten, wurde die Bewehrung derart geplant, dass die Eisenmenge in der Längeneinheit aller bewehrten Körper, ausser in Gruppe C, beinahe gleich oder zweimal so gross wie diese war. Zum Beispiel ergab sich die Eisenmenge in jeder Reihe wie folgt:

Zusammenstellung 2. Eisenmenge.

V_e eine Eisenmenge für die Längeneinheit,

f_e der Flächeninhalt des Querschnitts eines 6.35 mm starkem Rundeisen.

Gruppe	Reihe	Bewehrungsart	Eisenmenge $V_e = C f_e$ Koeffizient C
—	1	ohne Eiseneinlagen	0
	2	Spiralen	9.9
A	3	Spiralen	10.0
	4	Spiralen	10.4
	5	Spiralen und Längseisen	19.9
	6	Spiralen und Ringe	19.8
B	7	Spiralen und Längseisen	20.0
	8	Spiralen und Ringe	20.3
	9	Längseisen und Ringe	19.9
	10	doppelte Spiralen ¹⁾	17.0
C	11	doppelte Spiralen ¹⁾ und Längseisen	29.0
	12	Spiralen und Längseisen	13.0

6. Körper für Zug-, Druck- und Scherversuche.

Ferner wurden hergestellt:

1) 12 Zugkörper mit kreisförmigem Querschnitt von 15 cm Durchmesser

1) In dieser Reihe betrug sich die Eisenmenge äusserer und innerer Spiralen dasselbe Verhältnis wie zwischen ihren Durchmessern, d. i. 24:17=rd. 10:7.

in der Mitte und 45 cm Höhe;

2) 6 Zylinder mit kreisförmigem Querschnitt von 15 cm Durchmesser und 30 cm Höhe zur Ermittlung der Druckfestigkeit des Betons;

3) 6 Zylinder mit den Abmessungen wie bei Ziffer 2) zur Ermittlung der Scher- oder Schubfestigkeit des Betons, mittels der Belastung gemäss Abb. 11.

Dritter Abschnitt. Baustoffe der Versuchskörper.

7. Zement.

Der verwandte Zement war das Produkt von der Niederlassung Kawasaki, Asano Portlandzementfabrik A.-G. Die Prüfung des Zementes gemäss der Normen, bestimmt vom Ministerium für Landwirtschaft und Handel im Jahre 1919, lieferte die folgenden Ergebnisse:

Zusammenstellung 3. Ergebnisse der Zementprüfung.

vom 31. Juni bis 28. August, 1926

(a) Mechanische Eigenschaften

Feinheit der Mahlung: 0.002 vH. Rückstand auf dem Sieb von 900 Maschen auf 1 qcm, und 1.602 vH. Rückstand auf dem Sieb von 4900 Maschen auf 1 qcm.

Bindezeit: Zimmertemperatur 28°-32°C. Wasserzusatz 28.5 vH. in Gewichtsteil. Erhärtungsbeginn, nach 1 Stunde und 40 Minuten. Erhärtungsschluss, nach 5 Stunden und 10 Minuten.

Volumenbeständigkeit: die normengemässen Kuchen zeigten weder Kantenrisse noch Verkrümmungen, nach Lagerung von 28 Tagen (1 Tag in feuchter Luft und 27 Tage unter Wasser), sowie nach Kochprobe dauernd 1½ Stunden.

Spezifisches Gewicht: 3.077.

(b) Chemische Eigenschaften

Gehalt besonderer Stoffe: Magnesia 1.335 vH. Schwefelsäure-Anhydrid 1.790 vH.

Brennungsabnahme: 2.290 vH.

(c) Festigkeiten¹⁾

Zugfestigkeit: bei reinem Zement $K_z=64.6$ kg/qcm, nach 7 Tagen (1 Tag in feuchter Luft und 6 Tage unter Wasser); bei Mörtel in der Mischung

1) Diese sind die Mittelwerte von den 4 höchsten unter 6 Proben.

von 1 Gewichtsteil Zement und 3 Gewichtsteilen Normensand $K_z=24.3$ kg/qcm,) nach 7 Tagen; $K_z=30.9$ kg/qcm, nach 28 Tagen (1 Tag in feuchter Luft und 27 Tage unter Wasser)

Druckfestigkeit: bei Mörtel in der Mischung von 1 Gewichtsteil Zement und 3 Gewichtsteilen Normensand $K_z=268.5$ kg/qcm, nach 28 Tagen.

8. Zuschlagstoffe.

Die verwandten Zuschlagstoffe waren starker, rundkörniger Sand und Kies aus dem Fluss Tama. Obwohl Sand und Kies eigentlich ziemlich rein waren, wurden sie doch nach Lieferung gewaschen und durchgesiebt, um zu grosse Körner zu entfernen. Bei der Waschung des Sandes, muss man so achtsam sein, damit feinste Materialien nicht fortschwimmen, die für den dichten Beton ganz nötig sind. Bei diesen Versuchen wurde Sand in einem hölzernen, rechteckigen Wasserbehälter mit den Abmessungen von etwa 2 m Länge, 1.5 m Breite, und 0.5 m Tiefe, sorgfältig gewaschen, in der Weise, dass der Sand im Behälter durchgestöbert und das beschmutzte, obere Wasser wiederholt abgeleitet werden sollte.

Siebversuche¹⁾ der beiden Zuschlagstoffe ergaben folgenden Ergebnisse:

Zusammenstellung 4. Siebversuche der Zuschlagstoffe.

Rückstand auf Sieb	Lochweite (mm)	Kies (vII)	Sand (vII)	gemischt ²⁾ (vII)
1	25.4	—	—	—
3/4	19.0	2.7	—	1.8
3/8	9.5	50.1	—	33.4
Nr. 4	4.670	94.0	0.4	62.8
8	2.380	100.0	3.6	67.9
16	1.190		21.0	73.3
30	0.590		56.6	85.5
50	0.297		79.7	93.2
100	0.149		98.2	99.4
gesamt				517.7
Feinheitämodul				5.177

9. Anmachwasser.

Das Mischungswasser des Betons wurde aus der Stadtwasserleitung von Kawasaki geliefert, das also ganz frei von Salzen, Säuren, Alkalien, Ölen,

1) Dafür wurde amerikanische, Tylersche Siebenreihe verwendet,

2) Im Verhältnis der Gewichtsteile von Sand: Kies=0.486:1.0 oder=1.0:2.057. Es entspricht dem Raumteilverhältnis von Sand: Kies=1:2.

Fetten und anderen schädlichen Gehalten war.

10. Zusammensetzung des Betons.

Sie betrug:

300 kg Zement, 400 liter Sand, 800 liter Kies;

oder wenn man das Raumgewicht des Zementes wie 150 kg für 100 liter, d. i. 1500 kg für 1 m³ annimmt, so entspricht sie dem Mischungsverhältnis in Raumteilen von 1 : 2 : 4.

Die Raumgewichte von Sand und Kies wurden zuerst durch unmittelbares Messen mit vollkommen trocknen Materialien ermittelt, und diesen Einheitsgewichten gemäss wurden die getrockneten Zuschlagstoffe für die wirkliche Mischung zur Herstellung der Probekörper gewogen.

11. Armierungseisen.

Das als Spiralen, Längseisen sowie Ringe verwandte Rundeisen war durchaus für alle Körper von 6.35 mm Nominaldurchmesser,¹⁾ und die Prüfung ergab die Zugfestigkeit zu unten:

Zusammenstellung 5. Festigkeit des Eisens.

Bezeichnung	Durchmesser (cm)			Mittlerer Flächeninhalt (qcm)	max. Belastung (kg)	Zugfestigkeit ²⁾ (kg/qcm)	Längenänderung ³⁾ (vH)
	max.	min.	im Mittel				
1	0.668	0.616	0.642	0.3237	1263	3900	—
2	0.654	0.624	0.639	0.3207	1282	4000	17.6
3	0.663	0.635	0.649	0.3308	1252	3790	—
4	0.657	0.614	0.635	0.3167	1225	3870	—
5	0.677	0.616	0.646	0.3278	1272	3880	14.9
6	0.663	0.621	0.642	0.3237	1273	3930	—
Durchschnitt			0.642	0.3239	1261	3900	

Gemäss der Beobachtung, war die Streckgrenze ausgeprägt vorhanden, wie es in der Schaulinie zwischen der Belastung und der Formänderung nach Abb. 12 ersehen werden kann.

Vierter Abschnitt. Herstellung der Versuchskörper.

12. Form für Torsionskörper.

Zur Herstellung der Torsionskörper dienten senkrecht stehende, hölzerne

-
- 1) Es war das eingeführte Flusseisen, wahrscheinlich aus Deutschland.
 - 2) Die Zugfestigkeit wurde aus der max. Belastung dividiert durch mittleren anstatt min. Flächeninhalt gerechnet, also stellt sie nicht einen wirklichen Festigkeitswert dar.
 - 3) Die Längenänderung des Probestücks wurde in mm auf die Messstrecke von 20 cm beobachtet, und daraus gerechnet.

Formen, wie in Abb. 13 dargestellt. Sie waren in 4 gleiche Teile zu zerlegen; die aber je 2 und 2 durch Schraubenbolzen fortwährend fest verbunden wurden, und beim Ausschalen parallel voneinander entfernt. 4 Formen wurden verschafft, wovon jede ungefähr 24-mal gebraucht werden sollte, weil im ganzen 95 Torsionskörper hergestellt wurden.

Vor dem Gebrauch wurden die Formen jedesmal gereinigt, geölt, und dann abgewischt.

Es ist dargestellt von: Abb. 14 ein Versuchskörper nach dem Ausschalen; Abb. 15 eine in 2 Teils gespaltene Form; Abb. 16 eine für Betonierung fertiggemachte Form; und Abb. 17 die Ausschalung, wobei ein halber Formteil entfernt wurde, zuerst durch Stossbolzen und dann mit Händen.

13. Vorbereitung des Eisens.

Die Haken der Längseisen sowie der Spiralen lagen je in einem 15.875 mm starken Quereisen, und wurden dazu mittels Azetylens geschweisst, das nahe den Körperenden als Ring eingelegt war. Die Ringe wurden gerade gestossen und dann geschweisst. Die Spiralen wurden entlang der schraubförmigen Rinnen in der Oberfläche der zusammenklappbaren Gusseisenformen zusammengesetzt, zu hinzugefügten Ringen oder Längseisen mittels Azetylens geschweisst, oder in denjenigen Fällen, wo Spiralen allein eingelegt werden sollten, mit Draht in der Längs- bzw. Querrichtung zueinander verbunden, um die Spiralen in der gewünschten Lage festzuhalten, und dann aus den zusammengeklappten Formen zu entfernen. Diese Gusseisenformen sind in Abb. 18 und 19 dargestellt.

Die fertigen Eisengestelle für die Körper in Reihe 2 bis 12 zeigen sich, einzeln in Abb. 20 bis 30, und zusammengestellt in Abb. 31.

14. Mischung des Betons.

In Bezug auf die Rechnung des Raumgewichts des Zementes wurde keine Frage aufgeworfen, weil dasselbe anfangs entschieden war, wie 1500 kg für 1 m³ anzunehmen. Die Raumgewichte der Zuschlagstoffe verändern sich aber gemäss ihrem Wassergehalt bedeutend. Insbesondere wird dasselbe des Sandes vom Wassergehalt beträchtlich beeinflusst. Das Messen oder das Wiegen des Sandes soll darum in getrocknetem oder mit Wasser völlig gestättigtem Zustand ausgeführt werden, damit eine Gleichheit der Sandmenge erwartet werden kann.

Das Raumgewicht des Tamasandes fand sich im Durchschnitt aus 8 Versuchen zu 1601 kg für 1 m³, und dasjenige des Tamakies im Durchschnitt

aus 11 Versuchen zu 1647 kg für 1 m³, ermittelt im vollkommen getrockneten Zustand¹⁾, während Sand und Kies ins Messgefäß lose gefüllt wurden.

Der Rauminhalt eines Torsionskörpers findet sich gemäss der Rechnung zu etwa 140 liter, und je nachdem wurde die zur Herstellung eines Körpers genügende Betonmenge in der Regel mit folgender Zusammensetzung ange-macht:

39.6 kg Zement, 84.5 kg (52.8 liter) Sand, 173.6 kg (105.6 liter) Kies, und 26.8 kg Wasser.

Diese Wassermenge entsprach zu 9 Gewichtsprozenten, oder Hundertteilen vom Gewicht der ganzen trockenen Stoffe. Im allgemeinen verändert sich aber die Wassermenge zwischen 9 (26.8 kg) und 9.5 (28.3 kg) Gewichtsprozenten, obgleich die erstere Prozentzahl meistens angenommen wurde.

Damit der untere vergrösserte Körperteil vollständig gefüllt und schön gemacht werden konnte, warf man zuerst in die Form den Mörtel ein, dessen Zusammensetzung wie folgt war:

5.2 kg Zement, 11.1 kg (7 liter) Sand, und 2.8 kg Wasser.

Sie entsprach in Raumteilen der Mischung von 1:2, wenn man das Raumbgewicht des Zementes wie 150 kg für 100 liter annahm. Diese Beton- und Mörtelmenge genügte zur Herstellung eines Versuchskörpers, in der Regel mit dem Rückstand des angemachten Betons von etwa 5 bis 10 kg. Beton sowie Mörtel wurden von Handmischung verfertigt, wie es in Abb. 32 dargestellt ist.

15. Konsistenz oder Flüssigkeit der Mischung.

9 Gewichtsprocente Wasser ergaben sich auf eine weiche Konsistenz oder eine hohe Flüssigkeit. Die Flüssigkeit der Mischung wurde durch die Setzprobe ermittelt.

Zu diesem Zweck bediente man sich eines beiderseits offenen 30 cm hohen konischen Bechers aus verzinktem Blech, nach Abb. 33, welcher an seiner Unterfläche horizontal abgeglichen, auf eine horizontale Unterlage aufgestellt wurde. Der zu untersuchende Beton wurde in demselben in 4 Schichten untergebracht, und mit dem Rundeisen horizontal abgestrichen. Es wurde dann

1) Einigermassen feuchter Sand ergab das Raumbgewicht im Mittel aus 5 Versuchen auf 1295 kg für 1 m³; wurde dieser Sand getrocknet, so erfolgte es: Volumenabnahme 21.2 vH. Gewichtsabnahme, d. i. Wassergehalt 2.2 vH. Raumbgewichtszunahme 24.2 vH. Einigermassen feuchter Kies ergab das Raumbgewicht im Mittel aus 5 Versuchen auf 1627 kg für 1 m³. In diesem Falle also nimmt das Raumbgewicht des Kies, wenn etwas feucht, um 1.2 vH. ab.

der Becher sorgfältig vertikal abgehoben und nebeneinander aufgestellt. Das Mass der Setzung bis zum obersten Punkt des zusammengesunkenen Betonkörpers wurde als ein Massstab der Konsistenz oder der Flüssigkeit aufgenommen.

Dieses Mass, d. i. der "Flüssigkeitsgrad", nach Versuchen fand sich zu: einzeln, 12.7 13.1 13.2 13.8 13.1 12.4 13.4 14.1 13.8 13.9 13.0 13.5 13.5 15.2 14.4 12.3; also im Mittel 13.5 cm.

16. Betonierung.

Die Torsionskörper wurden vom 30. Juni bis 19. September, 1926 hergestellt.

Das Einlegen des Betons erfolgte allmählich in Schichten von etwa 10 cm Höhe. Die Körper verblieben in der Regel 2 Tage in der Form; während dieser Zeit war die obere Fläche mit nass gehaltenen Strohmatten bedeckt. Dann wurden die Seitenwände entfernt und die frei werdenden Flächen gleichfalls mit feuchten Strohmatten bedeckt. Am 7. Tag wurden die Körper horizontal umgelegt. Abb. 32 zeigt auch nebeneinanderstehende, mit feuchten Strohmatten bedeckte Körper.

17. Lagerung der Versuchskörper.

Die Lagerung erfolgte dann bis zum vorhergehenden Tag der Prüfung auf feuchtem Boden; an den oberen Flächen und an den Seitenflächen war der Körper mit dauernd nassen Strohmatten bedeckt, welche täglich einigemal besprengt wurden. Gewöhnlich 19 Tage nachher, wurden die Körper um 180° gedreht, so dass die bis dahin unten gelegenen Flächen nach oben zu liegen kamen.

Abb. 34 und 35 stellen die Torsionskörper während der Lagerung, mit Strohmatten bedeckt, bzw. vorläufig unbedeckt, dar.

Die Körper für die Zug-, Druck- bzw. Scherversuche wurden in üblichen eisernen Formen hergestellt, und die Entschalung sowie die Lagerung erfolgten hauptsächlich wie bei den Torsionskörpern.

Fünfter Abschnitt. Durchführung der Versuche.

18. Versuchsordnung.

Alle Probekörper wurden beim Alter von ungefähr 45 Tagen zur Prüfung angeboten. Es begann am 11. September und endete am 8. November, 1926.

An den Torsionskörpern wurde folgendes beobachtet:

1) das Rissbildungsmoment, d. i. dasjenige Moment, unter welchem sich

die ersten Risse einstellten; ferner das Fortschreiten der Risse mit steigendem Verdrehungsmoment:

2) das Bruchmoment oder höchste Moment, d. i. dasjenige Moment, durch welches die Widerstandsfähigkeit des Körpers erschöpft wurde:

3) die Verdrehungen oder Verdrehungswinkel der 2 um 50 cm voneinander abstehenden Querschnitte im mittleren zylindrischen Teil des Verdrehungskörpers.

Zur Durchführung der Beobachtung Ziffer 3) bediente man sich 2 Teleskope, die mittels der Rechnung von Tangenten des Winkels 2θ die Verdrehung θ jedes im Betracht kommenden Punktes, unter der beliebigen Belastungsstufe, abmessen konnten, wie es in Abb. 36 dargestellt ist.

19. Torsionsmaschine.

Die Körper wurden in einer liegenden, besonders zu diesem Zweck angefertigten Torsionsmaschine unterworfen, derart, dass, abgesehen von dem Eigengewicht des Versuchskörpers, ein Verdrehungsmoment ohne begleitende Längs- bzw. Querkraft auf den wagrecht liegenden Körper einwirkte. Er ruhte dabei mit seinen quadratischen Köpfen in starken Gusseisenrahmen, wovon einer festgesetzt war, nur so dass er bei Aufladung sowie Abladung des Körpers in die Richtung der Achse des letztern bewegt werden konnte, und der andere war derart gestellt, dass damit sich die Maschinenwelle umdrehen konnte, mit deren Achse diejenige des Probekörpers in genauer Übereinstimmung gesetzt war. Zu dieser Maschinenwelle war ein Sektorrad fixiert, um welches ein Drahtseil zur Olsenschen Universalmaschine mit der Fähigkeit von 100 000 kg lief, so dass eine durch die Universalmaschine entwickelte Zugkraft ein Verdrehungsmoment in der Torsionsmaschine hervorbrachte.

In Abb. 37 ist die Torsionsmaschine dargestellt.

Infolge der Reibung zwischen dem Drahtseil und mehreren dazwischenliegenden Flaschen, sollte die in der Universalmaschine angezeigte Kraft nicht als die direkt das Verdrehungsmoment herbeiführende angesehen werden. Um die wirkliche Kraft, auf die die Verdrehung zurückzuführen war, direkt zu ermitteln, wurde ein Zugdynamometer mit der Fähigkeit von 10 000 kg dazwischen eingesetzt.

Es ist zur Schau gestellt in; Abb. 38 Anordnung von Torsionsmaschine, Zugdynamometer; Universalmaschine und Vorrichtung für die Beobachtung der Verdrehungen, Abb. 39 Vorrichtung für die Verdrehungsbeobachtung;

und Abb. 40 ein Torsionskörper unter Prüfung.

In allen Fällen war die die Verdrehung herbeiführende Kraft P an dem gleichen Hebelarm von 40 cm tätig, so dass die Grösse des Verdrehungsmomentes $40 \cdot P$ cmkg betrug.

20. Verfahren der Belastung.

Die Belastung geschah in folgender Weise:

1) für alle bewehrten Körper und die meisten unbewehrten Körper, wurde die Zugkraft, d. i. das Verdrehungsmoment allmählich langsam zum Bruch gesteigert. Im Augenblick, wo man die ersten Risschen bemerkte, und nachher bei jeder Steigerung des Momentes von 20 000 cmkg, wurde die Belastung während durchschnittlich 3 Minuten stillgehalten. Es fand daher das Stillhalten der Last z. B. bei Verdrehungsmomenten von 160 000, 180 000, 200 000, 220 000 cmkg usf. statt, und dabei wurden jedesmal die Flächen der bewehrten Körper nach Rissen, mittels elektrischen Lichtes und Vergrösserungsglases, wenn erforderlich, sorgfältig abgesucht.

2) für einige unbewehrte Körper wurde zuerst das Moment auf 20 000 cmkg gesteigert, unter welcher Stufe noch keine oder die geringste Verdrehung im Körper geschah, und die Last hielt das Gleichgewicht mit der Reibung bei Maschinenwelle. Nach rund 3 Minuten Dauer wurde das Moment auf 40 000 cmkg erhöht, die Last wurde während rund 3 Minuten stillgehalten, und dann fand Entlastung auf 20 000 cmkg statt. In derselben Weise folgte die Steigerung des Momentes auf 60 000, 80 000, 100 000 cmkg usf. und dazwischen wechselweise die Entlastung auf 20 000 cmkg.

Damit die kleinsten Risschen leicht bemerkt werden konnten, wurden die Oberflächen der Körper mit dem mittels Gelatine aufgelösten Kalk ganz dünn angestrichen.

Sechster Abschnitt. Festigkeiten des Betons.

21. Druckfestigkeit.

Die Druckfestigkeit, ermittelt an senkrecht stehend hergestellten Zylindern fand sich wie folgt:

Zusammenstellung 6. Druckfestigkeit des Betons.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Gewicht (kg)	K_c (kg/qcm)
				Durchm.	Höhe		
98	21.9.26	5.11.26	45	15.24	30.48	12.90	136
99	21.9.26	5.11.26	45	15.24	30.48	12.98	126

101	21.9.26	5.11.26	45	15.24	30.48	13.16	123
110	23.9.26	6.11.26	44	15.24	30.48	12.98	119
111	23.9.26	6.11.26	44	15.24	30.48	12.98	132
112	23.9.26	8.11.26	46	15.24	30.48	12.98	130
Durchschnitt.			45	15.24	30.48	13.05	128

Nämlich betrug der Mittelwert der Druckfestigkeit $K_c = 128 \text{ kg/qcm}$.

Da der Volumen des Zylinders 5.56 liter war, so fand sich durchschnittlich das Raumgewicht des Betons am Prüfungstag zu 2346 kg/m^3 .

22. Zugfestigkeit.

Die Zugfestigkeit wurde an senkrecht stehend hergestellten Zylindern ermittelt:

Zusammenstellung 7. Zugfestigkeit des Betons.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Gewicht (kg)	K_z (kg/qcm)
				Durchm.	Höhe		
102	21.9.26	5.11.26	45	15.24	30.48	25.05	11.0
103	21.9.26	5.11.26	45	15.24	30.48	24.94	12.3
104	21.9.26	5.11.26	45	15.24	30.48	24.94	10.4
105	21.9.26	5.11.26	45	15.24	30.48	24.98	13.4
106	21.9.26	5.11.26	45	15.24	30.48	25.05	9.3
107	21.9.26	5.11.26	45	15.24	30.48	24.86	9.6
114	23.9.26	6.11.26	44	15.24	30.48	24.71	14.8
115	23.9.26	6.11.26	44	15.24	30.48	24.83	10.7
116	23.9.26	6.11.26	44	15.24	30.48	24.90	11.0
117	23.9.26	8.11.26	46	15.24	30.48	24.83	15.5
118	23.9.26	8.11.26	46	15.24	30.48	24.79	15.7
119	23.9.26	8.11.26	46	15.24	30.48	24.86	14.8
Durchschnitt.			45	15.24	30.48	24.90	12.4

Nämlich betrug der Mittelwert der Zugfestigkeit $K_z = 12.4 \text{ kg/qcm}$, d. i. $12.4/128 = \text{rd. } 1/10$ der Druckfestigkeit K_c .

23. Scherfestigkeit.

Die Scher- oder Schubfestigkeit, ermittelt an den gleichen Zylindern wie bei Druckversuchen betrug:

Zusammenstellung 8. Scherfestigkeit des Betons.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Gewicht (kg)	K_s (kg/qcm)
				Durchm.	Höhe		
96	21.9.26	5.11.26	45	15.24	30.48	13.16	56.2
97	21.9.26	5.11.26	45	15.24	30.48	13.05	45.2

100	21.9.26	5.11.26	45	15.24	30.48	13.16	58.2
113	23.9.26	6.11.26	44	15.24	30.48	12.98	58.3
108	23.9.26	8.11.26	46	15.24	30.48	13.09	64.9
109	23.9.26	8.11.26	46	15.24	30.48	13.01	65.9
Durchschnitt.			45	15.24	30.48	13.07	58.1

Nämlich betrug der Mittelwert der Scherfestigkeit, gerechnet aus der gesamten Belastung dividiert durch die doppelte Querschnittsfläche, $K_s = 58.1$ kg/qcm, d. i. $58.1/128 = \text{rd. } 1/2$ der Druckfestigkeit K_c .

Da die Schubfestigkeit¹⁾ des Betons viel grösser als die Zugfestigkeit ermittelt wurde, wie bei üblichen Ergebnissen, sollte die letztere Festigkeit ohne weiteres den Bruch des Torsionskörpers entscheiden.

Siebenter Abschnitt. Versuchsergebnisse mit Unbewehrten Körpern.

24. Vorversuche.

Als Vorversuche wurden 4 unbewehrte Körper zuerst auf Torsion beansprucht.

Zusammenstellung 9. Vorversuche der Unbewehrten Körper

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm) ²⁾		Bruchmoment M_b (cmkg)
				Durchm.	Länge	
1	30.7.26	11.9.26	43	30.00	149.7	126 000
2	30.7.26	13.9.26	45	30.00	149.6	148 000
3	31.7.26	14.9.26	45	30.05	149.8	140 000
4	31.7.26	14.9.26	45	29.98	150.0	158 000
Durchschnitt.			45	30.01	149.8	143 000

Diese Körper wurden unter den zueinander ungleichen, und von allen anderen verschiedenen Verhältnissen hergestellt, d. h. der dazu verwandte Sand wurde nicht im voraus vollkommen getrocknet, weshalb etwas zu wenig Sandmenge, als bestimmt, gebraucht werden musste.

Die Ergebnisse der Vorversuche wurden wesentlich viel höher als diejenigen der Hauptversuche ermittelt, wahrscheinlich infolge der Verschiedenheit der Sandmenge. Diese Vermutung des Verfassers hat ihre Richtigkeit, weil die

1) Nach der Meinung des Verfassers, ist es nicht nötig, zwischen der Scher- und Schubfestigkeit einen Unterschied zu machen, ebenso wie Mörsch.

2) Durchmesser, im Mittel aus 3 Messungen; und Länge, im Mittel aus 2 Messungen.

Festigkeit des Betons zusammengesetzt mit den gemischten Zuschlagstoffen von der ziemlich hohen Dichtigkeit, nach der Theorie des Prof. Talbot, hauptsächlich von der Festigkeit des Mörtels entschieden werden muss, die gemäss der Verminderung der Sandmenge erhöht wird.

25. Hauptversuche.

Für die Haupttorsionsversuche mit dem unbewehrten Beton wurden insgesamt 12 Körper verschafft, wovon 8 nach 20. Ziffer 1) geprüft wurden, und andere 4 nach Ziffer 2). Die Versuche dauerten über 3 Monate, vom Sommer bis Herbst, und 4 Körper am Anfang, und 8 Körper am Ende der ganzen Versuchsreihen wurden auf Torsion beansprucht, damit der Einfluss der Temperatur während der Lagerung der Körper auf den Mittelwert der Bruchmomenten ausgeschlossen werden sollte.

Zusammenstellung 10. Hauptversuche der Unbewehrten Körper

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Bruchmoment M_b (cmkg)
				Durchm.	Länge	
5	2.8.26	16.9.26	45	30.03	149.8	128 000
6	2.8.26	16.9.26	45	30.05	149.8	124 800
7	3.8.26	17.9.26	45	29.98	149.7	126 000
8	3.8.26	17.9.26	45	30.08	149.7	112 000
90	13.9.26	28.10.26	45	29.93	149.8	87 600 ¹⁾
93	17.9.26	1.11.26	45	29.87	149.8	102 000
94	19.9.26	2.11.26	44	29.96	150.0	123 600
95	19.9.26	2.11.26	44	30.12	149.7	129 600
Durchschnitt			45	30.00	149.8	120 860
88	12.9.26	27.10.26	45	30.05	150.0	110 400
89	13.9.26	28.10.26	45	29.90	149.9	68 800 ²⁾
91	14.9.26	29.10.26	45	29.93	149.8	96 000
92	17.9.26	1.11.26	45	29.90	149.9	88 800
Durchschnitt			45	29.95	149.9	98 400

Also bemerkt man keinen Unterschied zwischen den Körpern hergestellt im Sommer und im Herbst. Bei den Körpern in der ersten Gruppe in der

1) Beim Körper 90 wurde die Belastung mit dem Stillhalten von rund 3 Minuten Zeitdauer, also in der von den anderen 7 Körpern in der Gruppe verschiedenen Weise gesteigert. Dieser Wert wurde deshalb aus dem Durchschnitt ausgenommen.

2) Beim Körper 89 war ein Anfangsquerriss in der Nähe eines Kopfes bemerkt, welcher während der Behandlung des Körpers stattfinden musste. Dieser Wert wurde auch aus dem Durchschnitt ausgenommen.

obigen Zusammenstellung fanden nacheinander die Belastung und die Entlastung statt, und bei den Körpern in der zweiten Gruppe wurde die Last allmählich langsam zum Bruch gesteigert.

Kein Wunder darin, dass der Mittelwert der ersten Gruppe viel höher als derjenige der zweiten Gruppe beträgt, da die in Betracht kommenden Weise wiederholte Belastung gewöhnlich die Festigkeit aller Materialien vermindern soll.

Bei den Versuchen mit unbewehrten Körpern beobachtete man; 1) der Bruch des Betonkörpers entstand in einer auf dem Mantel unter 45° verlaufenden Schraubenlinie; 2) der Bruch erfolgte in meisten Fällen im zylindrischen Körperteil, in der Nähe des festgesetzten bzw. umgedrehten Kopfes in einigen Fällen, und in der Mitte des Körpers in anderen; 3) das Rissbildungsmoment fiel mit dem Bruchmoment zusammen, oder in anderen Worten, geschah der Bruch ganz plötzlich, oder gleich nach Eintreten des ersten Risses. Abb. 41 bis 43 zeigen die Bruchstücke der unbewehrten Körper.

Achter Abschnitt. Versuchsergebnisse mit Körpern in Gruppe A.

26. Körper in Reihe 2.

Bei den Körpern in Reihe 2, die mit 7 45° -Spiralen bewehrt wurden, wurde es ermittelt:

Zusammenstellung 11. Versuche mit Körpern in Reihe 2.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Rissbildungsmoment M_a (cmkg)	Bruchmoment M'_a (cmkg)
				Durchm.	Länge		
43	21.8.26	5.10.26	45	29.90	149.9	140 800	183 600
44	21.8.26	5.10.26	45	29.97	149.9	156 000	192 000
45	22.8.26	6.10.26	45	30.00	150.0	134 000	197 600
46	22.8.26	6.10.26	45	29.93	149.9	147 200	196 400
47	23.8.26	7.10.26	45	29.90	150.0	131 200	182 800
48	23.8.26	7.10.26	45	29.87	150.0	138 400	195 200
77	7.9.26	22.10.26	45	29.93	150.0	147 200	189 600
78	7.9.26	22.10.26	45	30.09	149.9	138 000	198 000
Durchschnitt			45	29.95	150.0	141 600	191 900

27. Körper in Reihe 3.

Bei den Körpern in Reihe 3, die mit 5 60° -Spiralen bewehrt wurden,

wurde es ermittelt:

Zusammenstellung 12. Versuche mit Körpern in Reihe 3.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Rissbildungsmoment M_a (cmkg)	Bruchmoment M'_a (cmkg)
				Durchm.	Länge		
49	24.8.26	8.10.26	45	29.93	150.0	136 400	218 400
50	24.8.26	8.10.26	45	29.93	150.0	126 800	176 000
51	25.8.26	9.10.26	45	30.07	150.0	150 400	188 000
52	25.8.26	9.10.26	45	30.00	149.9	150 800	185 600
53	26.8.26	9.10.26	44	30.00	149.8	136 800	196 000
54	26.8.26	11.10.26	46	30.01	150.0	122 200	183 200
79	8.9.26	23.10.26	45	30.01	149.8	154 000	186 800
80	8.9.26	23.10.26	45	30.03	150.1	126 000	180 000
Durchschnitt			45	30.00	150.0	137 900	189 250

28. Körper in Reihe 4.

Bei den Körpern in Reihe 4, die mit 9 30°-Spiralen bewehrt wurden, wurde es ermittelt:

Zusammenstellung 13. Versuche mit Körpern in Reihe 4.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Rissbildungsmoment M_a (cmkg)	Bruchmoment M'_a (cmkg)
				Durchm.	Länge		
55	27.8.26	11.10.26	45	29.96	150.1	121 200	179 200
56	27.8.26	11.10.21	45	30.00	150.1	119 200	172 800
57	28.8.26	12.10.26	45	30.05	149.9	145 600	176 000
58	28.8.26	12.10.26	45	30.05	149.8	142 000	176 800
59	29.8.26	13.10.26	45	30.03	150.0	134 800	174 800
60	29.8.26	13.10.26	45	30.01	150.0	130 000	176 000
81	9.9.26	23.10.26	44	30.01	149.7	142 400	189 000
82	9.9.26	25.10.26	46	29.98	149.8	115 200	178 000
Durchschnitt			45	30.01	149.9	131 300	177 850

29. Übersicht von Gruppe A.

Die zu dieser Gruppe gehörigen Körper sind ausschliesslich mit den Spiralen bewehrt, deren Schraubenwinkel aber in 3 Reihen voneinander verschieden sind, wie vorher erwähnt, jedoch wurde die Eisenmenge ganz gleich bestimmt. In diesem Verhältnis kann man hier die Einflüsse der gleichen Eisenmenge in den verschiedenen Schraubenwinkeln miteinander vergleichen, währenddem die erforderliche statische Auswertung der Ergebnisse

nachher folgt.

In der nachstehenden Zusammenstellung heisst es:

ΔM_a Überschuss des Rissbildungsmoments im Vergleich mit den unbewehrten Körpern, d. i. $M_a - 120\ 860$ cmkg.¹⁾

$\Delta M'_a$ Überschuss des Bruchmoments im Vergleich mit den unbewehrten Körpern, d. i. $M'_a - 120\ 860$ cmkg.¹⁾

Zusammenstellung 14. Sammlung von Gruppe A.

Reihe	Zahl der Körper	Gewicht des Eisens (kg)	Rissbildungsmoment			Bruchmoment		$\Delta M'_a$
			M_a	Vergl.	ΔM_a	M'_a	Vergl.	
1	8	0	120 860	1.00	0	120 860	1.00	0
2	8	6.4	141 600	1.17	20 740	191 900	1.59	71 040
3	8	6.6	137 900	1.14	17 040	189 250	1.57	68 390
4	8	6.9	131 300	1.09	10 440	177 850	1.47	56 900

Aus diesen Ergebnissen kann man sogleich die grösste Wirksamkeit der 45°-Spiralen erkennen.

Bei den Versuchen mit bewehrten Körpern wurde im allgemeinen folgendes bemerkt; 1) das Rissbildungsmoment fand sich deutlich ausgeprägt höher als bei den unbewehrten Körpern; 2) das Bruchmoment konnte um vieles über das Rissbildungsmoment gesteigert werden; 3) die Risse verliefen wie bei den unbewehrten Körpern nach einer rd. 45° ansteigenden Schraubenlinie; 4) der erste Riss trat in allen Fällen in den zylindrischen Körperteil ein, teilweise in der Nähe des festgesetzten bzw. umgedrehten Kopfes, oft auch in der Mitte des Körpers; 5) der erste Riss war so fein, dass er nur durch sorgfältige Untersuchungen bemerkt werden konnte, trotzdem war er in einigen Fällen von der ziemlich langen Erstreckung; 6) mit steigender Last verlängerte sich der Riss und zahlreiche neue Risse waren erschienen; 7) in der Nähe des Bruchmoments schritten die Risse rasch fort, und öffneten sich erheblich; 8) die Risse schritten selbst, während des Stillhaltens der Belastung fort; 9) am Bruch öffneten sich einige Risse beträchtlich, z. B. auf der Breite von 3 mm oder mehr, dagegen wurde der übrige Körperteil entlastet, und die darin laufenden Risse verringerten einigermassen ihre Breite; 10) beim Bruchmoment, oder im eigentlichen Sinne beim höchsten Moment war die Widerstandsfähigkeit des Körpers noch nicht erschöpft; 11)

1) vgl. Zusammenstellung 10.

bei Fortsetzung der Verdrehung ging die Last allmählich vom höchsten Moment zurück, dessenungeachtet dauerten der Fortschritt und die Verbreitung der Risse fort, bis der ausserhalb der Bewehrung gelegene Beton auf der gesamten Fläche des zylindrischen Teils lose wurde; 12) die eingelegten Eisen konnten zur Zerstörung nicht beansprucht werden.

Abb. 44 zeigt Körper in Reihe 2 im Zustand nach dem Versuch, Abb. 45 Körper in Reihe 3, und Abb. 46 Körper in Reihe 4. Die beobachteten Risse sind mit schwarzer Farbe nachgezeichnet. Die Zahlen bedeuten die am Hebelarm von 40 cm wirkenden Verdrehungskräfte in 1000 kg, unter denen die daneben befindlichen Risstrecken festgestellt worden sind.

Neunter Abschnitt. Versuchsergebnisse mit Körpern in Gruppe B.

30. Körper in Reihe 5.

Bei den Körpern in Reihe 5, die mit 7 45°-Spiralen und 10 Längseisen bewehrt wurden, wurde folgendes ermittelt:

Zusammenstellung 15. Versuche mit Körpern in Reihe 5.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Rissbildungsmoment M_a (cmkg)	Bruchmoment M_b (cmkg)
				Durchm.	Länge		
29	14.8.26	28. 9.26	45	30.08	149.9	134 000	194 800
30	14.8.26	28. 9.26	45	30.03	150.0	140 800	208 400
31	15.8.26	29. 9.26	45	30.01	149.9	138 000	206 000
32	15.8.26	29. 9.26	45	30.03	150.0	120 000	196 400
33	16.8.26	30. 9.26	45	30.05	149.9	131 200	198 800
34	16.8.26	30. 9.26	45	30.00	149.8	128 000	200 000
35	17.8.26	1.10.26	45	30.00	150.0	136 000	204 800
74	5.9.26	20.10.26	45	29.93	149.8	146 400	199 200
Durchschnitt			45	30.02	149.9	134 400	201 050

31. Körper in Reihe 6.

Bei den Körpern in Reihe 6, die mit 7 45°-Spiralen und 18 Ringen bewehrt wurden, wurde es ermittelt:

Zusammenstellung 16. Versuche mit Körpern in Reihe 6.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Rissbildungsmoment M_a (cmkg)	Bruchmoment M'_a (cmkg)
				Durchm.	Länge		
9	4.8.26	18. 9.26	45	30.00	149.9	158 000	212 000
10	4.8.26	18. 9.26	45	30.00	149.9	166 000	211 200
11	5.8.26	18. 9.26	44	29.78	150.0	162 000	216 000
12	5.8.26	20. 9.26	46	30.03	149.5	157 200	221 200
13	6.8.26	20. 9.26	45	30.00	149.9	168 800	208 800
14	6.8.26	20. 9.26	45	30.03	149.7	152 000	206 000
22	10.8.26	23. 9.26	45	30.05	149.8	152 000	200 000
72	4.9.26	19.10.26	45	29.96	149.8	162 800	203 200
Durchschnitt			45	29.98	149.8	159 850	209 800

32. Körper in Reihe 7.

Bei den Körpern in Reihe 7, die mit 5 60°-Spiralen und 10 Längseisen bewehrt wurden, wurde es ermittelt:

Zusammenstellung 17. Versuche mit Körpern in Reihe 7.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Rissbildungsmoment M_a (cmkg)	Bruchmoment M'_a (cmkg)
				Durchm.	Länge		
37	18.8.26	2.10.26	45	30.00	149.8	141 200	188 800
38	18.8.26	1.10.26	44	30.02	149.9	134 800	190 000
39	19.8.26	2.10.26	44	30.00	149.9	146 800	200 000
40	19.8.26	4.10.26	46	30.05	150.0	124 400	204 000
41	20.8.26	4.10.26	45	30.05	150.0	151 200	212 800
42	20.8.26	4.10.26	45	30.03	150.0	143 200	204 000
75	6.9.26	21.10.26	45	29.98	150.0	156 800	212 400
76	6.9.26	21.10.26	45	29.95	149.8	136 000	197 600
Durchschnitt			45	30.01	149.9	141 800	201 200

33. Körper in Reihe 8.

Bei den Körpern in Reihe 8, die mit 8 30°-Spiralen und 18 Ringen bewehrt wurden, wurde es ermittelt:

Zusammenstellung 18. Versuche mit Körpern in Reihe 8.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Rissbildungsmoment M_a (cmkg)	Bruchmoment M'_a (cmkg)
				Durchm.	Länge		
15	7.8.26	21. 9.26	45	30.00	150.0	159 200	209 200
16	7.8.26	21. 9.26	45	30.03	150.0	144 000	198 000

17	8.8.26	22. 9.26	45	30.08	150.0	168 800	216 000
18	8.8.26	22. 9.26	45	30.03	149.9	155 200	214 000
19	9.8.26	22. 9.26	44	30.02	149.8	153 200	208 800
20	9.8.26	23. 9.26	45	30.03	150.0	156 000	216 000
21	10.8.26	23. 9.26	44	30.03	150.0	146 000	202 000
71	4.9.26	19.10.26	45	30.00	149.8	133 200	204 800
Durchschnitt			45	30.03	149.9	151 950	208 600

34. Körper in Reihe 9.

Bei den Körpern in Reihe 9, die mit 10 Längseisen und 18 Ringen bewehrt wurden, wurde es ermittelt:

Zusammenstellung 19. Versuche mit Körpern in Reihe 9.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Rissbildungsmoment M_a (cmkg)	Bruchmoment M'_a (cmkg)
				Durchm.	Länge		
23	11.8.26	25. 9.26	45	30.00	149.8	140 000	140 000
24	11.8.26	25. 9.26	45	29.87	149.8	120 000	132 000
25	12.8.26	25. 9.26	44	30.02	149.8	118 800	124 000
26	12.8.26	27. 9.26	46	30.02	149.8	112 800	134 000
27	13.8.26	27. 9.26	45	30.03	150.0	129 600	145 200
28	13.8.26	27. 9.26	45	30.00	149.9	116 000	133 600
36	17.8.26	1.10.26	45	29.98	149.7	116 800	136 000
73	8.9.26	20.10.26	45	29.99	150.0	112 000	136 000
Durchschnitt			45	29.99	149.9	120 750	135 100

35. Übersicht von Gruppe B.

Die Bewehrungen der zu dieser Gruppe gehörigen Körper sind die vereinigten 1) Spiralen und Längseisen, 2) Spiralen und Ringe, oder 3) Längseisen und Ringe. Es ist deutlich zu erkennen, dass 45°-Spiralen die höchste Wirksamkeit besitzen, und dass der Einfluss der Spiralbewehrung auf die Widerstandsfähigkeit gegen Torsion gemäss der Abweichung des Schraubenwinkels von 45° vermindert wird. Vom Anfang an ist der Verfasser der Ansicht gewesen, dass die zu 60°-Spiralen hinzugefügten Längseisen und die zu 30°-Spiralen beigefügten Ringe die gemäss der Abweichung des Schraubenwinkels von 45° verminderte Wirksamkeit der Spiralbewehrung wieder erlangen sollen, indem die zu 45°-Spiralen hinzugefügten Längseisen bzw. Ringe vergeblich für die Erhöhung des Torsionswiderstands des Körpers sind. Gemäss dieser Annahme wurde es beschlossen, Längseisen mit 60°-

Spiralen, und Ringe mit 30°-Spiralen zu vereinigen, ferner diese zwei mit der vereinigten Bewehrung der 45°-Spiralen und der Längseisen bezw. Ringe zu vergleichen.

Die Eisenmenge aller Körper in dieser Gruppe ist durchaus gleich und doppelt diejenigen in der Gruppe A. Die Ergebnisse sind gesammelt im nachstehenden:

Zusammenstellung 20. Sammlung von Gruppe B.

Reihe	Zahl der Körper	Gewicht des Eisens (Kg)	Rissbildungsmoment			Bruchmoment		$\Delta M'a$
			M_a	Vergl.	ΔM_a	$M'a$	Vergl.	
1	8	0	120 860	1.00	0	120 860	1.00	0
5	8	10.7	144 400	1.19	23 540	201 050	1.66	80 190
6	8	10.3	159 850	1.32	38 990	209 800	1.74	88 940
7	8	10.9	141 800	1.17	20 940	201 200	1.66	80 340
8	8	10.9	151 950	1.26	31 090	208 600	1.73	87 740
9	8	10.4	120 750	1.00	0	135 100	1.12	14 240

Diese Ergebnisse kann man kurz zusammenfassen wie folgt; 1) im allgemeinen erhöhten einigermaßen die zu den Spiralen beigefügten Längseisen bezw. Ringe die Widerstandsfähigkeit der Körper; 2) zu den Spiralen hinzugefügt, waren die Ringe etwas wirksamer als die Längseisen; 3) bei den Körpern in Reihe 9, wo Längseisen und Ringe eingelegt wurden, zeigte die Bewehrung keinen Einfluss auf das Rissbildungsmoment und den geringsten auf das Bruchmoment; 4) bei den Körpern in Reihe 5 bis 8, waren die Risse auf den zylindrischen Flächen viel dichter verteilt als bei denjenigen in Gruppe A; 5) bei den Körpern in Reihe 9, verliefen die Risse zerstreut im Vergleich mit übrigen Körpern; 6) die Hauptrisse bei diesen Körpern verliefen in der Richtung einer unter rd. 45° ansteigenden Schraubenlinie, die nachfolgenden Risse aber etwas steiler.

Abb. 47 bis 51 zeigen die Körper in Reihe 5 bis 9 im Zustand am Schluss des Versuches.

Zehnter Abschnitt. Versuchsergebnisse mit Körpern in Gruppe C.

36. Körper in Reihe 10.

Bei den Körpern in Reihe 10, die mit 7 äusseren und 5 inneren 45°-Spiralen bewehrt wurden, ergab sich folgendes:

Zusammenstellung 21. Versuche mit Körpern in Reihe 10.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Rissbildungsmoment M_a (cmkg)	Bruchmoment M'_a (cmkg)
				Durchm.	Länge		
61	30.8.26	14.10.26	45	30.00	149.7	170 800	262 000
62	30.8.26	14.10.26	45	29.90	149.7	166 000	248 000
63	31.8.26	15.10.26	45	29.90	150.0	141 200	246 400
64	31.8.26	15.10.26	45	30.00	149.8	144 800	260 800
65	1.9.26	16.10.26	45	29.96	149.7	154 000	247 600
66	1.9.26	16.10.26	45	29.96	150.0	128 000	245 200
83	10.9.26	25.10.26	45	29.87	150.2	136 000	242 000
84	10.9.26	25.10.26	45	30.00	150.0	151 200	246 800
Durchschnitt			45	29.95	149.9	149 000	249 850

37. Körper in Reihe 11.

Bei den Körpern in Reihe 11, die mit den gleichen Spiralen wie in Reihe 10 und beigefügten 12 Längseisen bewehrt wurden, fand sich:

Zusammenstellung 22. Versuche mit Körpern in Reihe 11.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Rissbildungsmoment M_a (cmkg)	Bruchmoment M'_a (cmkg)
				Durchm.	Länge		
67	2.9.26	16.10.26	44	29.92	150.0	152 400	254 800
68	2.9.26	18.10.26	46	29.95	150.1	172 400	256 400
69	3.9.26	18.10.26	45	30.00	149.7	154 000	265 600
70	3.9.26	18.10.26	45	30.00	149.9	152 000	265 200
85	11.9.26	26.10.26	45	30.00	149.8	146 000	268 000
86	11.9.26	26.10.26	45	30.00	150.8	123 200	272 800
Durchschnitt			45	29.98	149.9	150 000	263 800

38. Körper in Reihe 12.

Beim Körper in Reihe 12, mit der Bewehrung von 5 inneren 45°-Spiralen und 6 beigefügten Längseisen, ergab sich:

Zusammenstellung 23. Versuche mit Körpern in Reihe 12.

Körper	Herstellungstag	Prüfungstag	Alter (Tage)	Abmessungen (cm)		Rissbildungsmoment M_a (cmkg)	Bruchmoment M'_a (cmkg)
				Durchm.	Länge		
87	12.9.26	27.10.26	45	30.04	150.0	112 400	128 400

39. Übersicht von Gruppe C.

Die zu dieser Gruppe gehörigen Körper sind von verschiedener Eisenmenge, deren man sich beim Vergleich der Wirksamkeit der in den verschiedenen Lagen eingelegten Spiralen bediente. Die Zusammenstellung der Ergebnisse ist wie folgt:

Zusammenstellung 24. Sammlung von Gruppe C.

Reihe	Zahl der Körper	Gewicht des Eisens (kg)	Rissbildungsmoment			Bruchmoment		ΔM_a
			M_a	Vergl.	ΔM_a	M'_a	Vergl.	
1	8	0	120 860	1.00	0	120 860	1.00	0
10	8	11.2	149 000	1.23	28 140	249 850	2.07	128 990
11	6	16.2	150 000	1.24	29 140	265 830	2.18	142 940
12	1	7.1	112 400	0.93	—	128 400	1.06	7 540

Bei den Versuchen dieser Körper beobachtete man folgendes; 1) die Risse bei den Körpern in Reihe 10 bzw. 11 waren am dichtesten auf den Flächen verteilt; 2) beim Körper in Reihe 12, wurden die wenigsten Risse bemerkt; 3) das Rissbildungsmoment der Körper in Reihe 10 bzw. 11 stellte sich ausgeprägt nicht höher ein, als bei den Körpern in Gruppe B, abgesehen von denjenigen in Reihe 9; 4) das Bruchmoment dagegen konnte beträchtlich über das Rissbildungsmoment hinaus gesteigert werden; 5) Körper in Reihe 11 konnten die höchste Belastung tragen, und Körper in Reihe 10 die zweithöchste; beide waren höher ausgeprägt als bei den übrigen Körpern; 6) das Rissbildungsmoment des Körpers in Reihe 12 war etwas niedriger als bei den unbewehrten Körpern, und das Bruchmoment einigermassen höher, aber diese Ergebnisse kann man nicht verlässlich behaupten, da nur ein Körper für Reihe 12 verschafft worden ist.

Abb. 52 und 53 stellen die Körper in Reihe 10 und 11 im Zustand nach Versuchen dar. Die Körper 70, 85 und 86 in Abb. 54 wurden auf die über das höchste Moment fortgesetzte Verdrehung beansprucht, infolgedessen wurde der ausserhalb der Bewehrung gelegene Beton lose, wie die Abbildung deutlich zeigt. Bei Körper 70 vergrösserte der losgewordene Beton teils den Durchmesser des Körpers von 30 cm zu 31.5 cm. Abb. 55 zeigt den Körper 70 vergrössert, und Abb. 56 stellt die gesamten Torsionskörper am Schluss der Versuche dar.

Im allgemeinen wurden die Mischung des Betons, sowie die Herstellung der Körper mit der grössten Sorgfältigkeit durchgeführt, und es wurde aus der Untersuchung der Bruchflächen der unbewehrten Körper deutlich bemerkt, dass der Beton eine verhältnismässig hohe Homogenität besass, woraus sich folgendes ergibt ; 1) die Einzelwerte in der versuchsergebnissen wichen nicht sehr vom Durchschnitt ab ; 2) die auf die Körperflächen verlaufenden Risse waren ohne wesentliche Ausnahmen gleichweit entfernt.

Elfter Abschnitt. Verdrehungswinkel.

40. Verdrehung der Unbewehrten Körper.

Von 12 unbewehrten Körpern in Hauptversuchen wurden 8 für die Untersuchung der Verdrehungswinkel angeboten, 4 nach 20. Ziffer 1) und 4 nach Ziffer 2). Wie vorher erwähnt, wurde die Verdrehung an 2 um 50 cm voneinander entfernten Punkten im zylindrischen Körperteil mittels Teleskope beobachtet.

Nimmt man an :

$l=50$ cm Entfernung der 2 in Betracht kommenden Punkte,

θ_A Verdrehung am Punkt A, nahe am festgesetzten Kopf,

θ_B dieselbe am Punkt B, nahe am umdrehenden Kopf,

θ_1 Verdrehungswinkel auf der Strecke l , und

θ derselbe für die Längeneinheit oder der spezifische Winkel, so ergeben sich die folgenden Zusammenhänge :

$$\theta_1 = \theta_B - \theta_A, \quad \theta = \theta_1 / l \dots\dots\dots(1)$$

Die aus den Versuchsergebnissen mittels Gl. (1) gerechneten spezifischen Verdrehungswinkel sind unten niedergelegt :

Zusammenstellung 25. Verdrehung der Unbewehrten Körper, (a)

Drehmoment (cmkg)	Verdrehung θ , in 10^{-6} , beim Körper im Mittel				
	90	93	94	95	
0-20 000	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2
0-40 000	1.7	1.5	2.1	1.5	1.7
0-60 000	3.4	2.9	3.7	3.2	3.3
0-80 000	4.8	5.2	5.5	4.9	5.1
0-100 000		6.9	7.2	6.9	7.0
0-120 000			9.6	8.8	9.2
beim Bruch	20.6	--	14.0	12.1	

Bei Körpern in der nachstehenden Zusammenstellung fanden abwechselnd Belastung und Entlastung statt, womit θ_0 , θ_1 bzw. θ , d. i. die gesamte, bleibende bzw. federnde oder elastische Verdrehung beobachtet wurde.

Zusammenstellung 26. Verdrehung der Unbewehrten Körper (b)

Drehmoment (cmkg)	beim Körper 88			beim Körper 89		
	θ_0	θ_1	θ	θ_0	θ_1	θ
0-20 000	0.3	—	—	0.2	—	—
20 000-40 000	1.9	0.1	1.8	1.7	0.1	1.6
20 000-60 000	3.6	0.2	3.4	3.4	0.1	3.3
20 000-80 000	6.1	0.5	5.6			
20 000-100 000	9.0	0.8	8.2			
beim Bruch	16.4			14.0		
	Beim Körper 91			beim Körper 92		
	θ_0	θ_1	θ	θ_0	θ_1	θ
0-20 000	0.1	—	—	0.1	—	—
20 000-40 000	1.5	0.1	1.4	1.7	0.2	1.5
20 000-60 000	3.4	0.2	3.2	3.7	0.3	3.4
20 000-80 000	5.6	0.4	5.2	5.8	0.5	5.3
beim Bruch	15.4			20.2		

41. Verdrehung der Bewehrten Körper.

Von 79 bewehrten Körpern wurden 57 für die Untersuchung der Verdrehungswinkel angeboten. Die Belastung wurde nach 20. Ziffer 1) allmählich zum Bruch gesteigert. Die mittels Gl. (1) gerechneten spezifischen Verdrehungswinkel in 10^{-6} sind in den Zusammenstellungen 27 bis 34 niedergelegt.

Zusammenstellung 27. Verdrehung der Bewehrten Körper (a)

Drehmoment (cmkg)	Reihe 2							
	43	45	46	47	48	77	78	im Mittel
0-20 000	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.2	0.4	0.2
0-40 000	1.3	2.5	2.5	2.6	2.3	2.6	2.6	2.3
0-60 000	4.2	5.0	6.7	4.2	6.3	6.6	5.4	5.5
0-80 000	6.5	8.4	9.8	—	7.4	8.2	7.7	8.0
0-100 000	10.2	12.7	12.3	9.9	10.9	11.4	9.2	10.8
0-120 000	13.5	15.3	15.8	—	16.3	16.2	11.4	14.8
0-140 000	16.1	39.3	21.8	—	—	17.2	—	23.6

0-160 000	89.9	103.6	59.0	88.1	--	32.8	41.1	69.1
0-180 000	156.4	141.3	109.3	139.1	--	--	79.1	125.0
beim Riss	30.6	33.9	48.2	29.6	23.7	22.5	18.5	
beim Bruch	299.9	398.9	226.0	436.8	249.3	--	194.9	

Zusammenstellung 28. Verdrehung der Bewehrten Körper, (b)

Drehmoment (cmkg)	Reihe 3								im Mittel
	49	50	51	52	53	54	79	80	
0-20 000	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.4	0.1	0.2
0-40 000	2.9	2.5	2.6	2.3	2.5	2.4	3.6	3.0	2.7
0-60 000	5.2	4.2	4.6	3.4	4.5	3.7	4.8	4.1	4.3
0-80 000	8.6	6.0	8.1	6.8	6.4	7.5	5.5	5.0	6.7
0-100 000	11.3	8.0	11.9	8.6	8.2	9.1	7.9	9.9	9.4
0-120 000	16.1	10.2	13.8	10.5	11.6	14.3	10.3	13.1	12.5
0-140 000	--	20.9	17.7	12.5	--	31.1	14.4	22.8	19.9
0-160 000	--	--	--	106.3	89.8	96.3	38.1	35.8	73.3
0-180 000	--	--	87.8	--	115.6	133.5	93.7	76.0	101.3
beim Riss	29.7	12.0	23.5	16.5	30.0	17.0	24.2	17.5	
beim Bruch	--	--	226.8	137.0	223.7	265.7	138.0	--	

Zusammenstellung 29. Verdrehung der Bewehrten Körper, (c)

Drehmoment (cmkg)	Reihe 4								im Mittel
	55	56	57	58	59	60	81	82	
0-20 000	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2
0-40 000	2.3	2.4	3.3	3.7	2.6	2.9	3.1	2.6	2.9
0-60 000	5.8	4.2	4.8	6.1	4.3	4.4	5.3	5.5	5.1
0-80 000	8.5	7.2	6.1	9.0	7.0	5.8	9.1	9.4	7.6
0-100 000	10.7	9.2	10.5	11.4	10.5	9.2	10.3	12.3	10.5
0-120 000	14.1	--	12.9	15.2	14.0	14.4	13.1	--	14.0
0-140 000	23.1	30.6	19.2	19.1	--	23.1	18.7	76.7	30.1
0-160 000	78.1	55.2	72.0	38.5	--	83.9	61.8	130.4	74.3
0-180 000	--	--	--	--	--	--	189.4	--	189.4
beim Riss	16.5	16.3	19.5	29.2	22.6	16.0	21.1	18.2	
beim Bruch	263.5	330.9	292.9	--	--	286.6	356.3	393.2	

Zusammenstellung 30. Verdrehung der Bewehrten Körper, (d)

Drehmoment (cmkg)	Reihe 5								im Mittel
	29	30	31	32	33	34	35	74	
0-20 000	0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0	0.2
0-40 000	1.0	1.0	2.7	1.1	2.7	3.0	2.5	1.0	1.9
0-60 000	2.3	3.7	4.3	3.8	4.7	5.1	4.8	2.0	3.8
0-80 000	4.8	6.8	7.1	5.6	7.1	8.8	7.9	3.8	6.5
0-100 000	8.4	9.6	9.7	8.3	10.9	12.7	10.8	7.6	9.8
0-120 000	12.8	14.0	10.5	12.0	15.0	18.5	15.0	10.6	13.6
0-140 000	—	29.1	—	—	27.1	26.6	20.5	14.6	23.6
0-160 000	63.1	44.0	39.0	—	102.1	77.2	60.3	42.4	61.2
0-180 000	37.7	107.0	71.8	—	141.6	129.1	94.5	82.5	102.0
0-200 000	—	139.2	104.6	—	—	219.9	128.2	—	148.0
beim Riss	16.8	32.2	14.4	—	37.1	32.8	22.5	20.2	
beim Bruch	204.9	255.0	229.5	—	—	219.9	252.4	275.9	

Zusammenstellung 31. Verdrehung der Bewehrten Körper, (e)

Drehmoment (cmkg)	R. 6	R. 8	Reihe 9		R.12
	72	71	36	73	87
0-20 000	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3
0-40 000	2.2	1.7	2.1	1.9	2.9
0-60 000	4.2	3.7	3.6	3.0	5.7
0-80 000	6.8	6.0	7.1	5.9	8.7
0-100 000	9.0	7.7	10.5	8.7	12.2
0-120 000	12.6	10.6	—	45.2	23.6
0-140 000	27.7	16.0	—	—	—
0-160 000	31.2	32.2	—	—	—
0-180 000	59.8	59.9	—	—	—
0-200 000	104.0	96.9	—	—	—
beim Riss	32.9	12.4	32.7	22.4	18.5
beim Bruch	154.2	217.4	248.9	181.6	—

Zusammenstellung 32. Verdrehung der Bewehrten Körper, (f)

Drehmoment (cmkg)	Reihe 7								im Mittel
	37	38	39	40	41	42	75	76	
0-20 000	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.2	0	0.4	0.2

0-40 000	2.6	3.0	3.0	2.0	1.2	2.2	2.4	3.3	2.5
0-60 000	4.9	5.6	4.6	3.3	4.6	5.5	5.4	4.1	4.8
0-80 000	8.0	8.7	6.4	5.1	6.4	6.6	6.5	6.8	6.8
0-100 000	11.2	11.8	9.3	8.3	9.3	9.1	8.6	8.9	9.6
0-120 000	13.3	14.2	11.5	12.4	12.8	12.9	11.8	10.5	12.4
0-140 000	26.1	—	24.1	30.3	23.8	—	15.1	—	23.9
0-160 000	49.9	79.3	76.1	64.2	—	—	—	45.5	63.0
0-180 000	113.1	129.4	128.6	114.6	96.1	—	60.9	60.6	100.5
0-200 000	—	—	315.7	168.1	145.8	—	126.4	—	189.0
beim Riss	29.5	23.5	32.4	18.8	29.9	—	22.2	16.2	
beim Bruch	353.5	924.0	315.7	—	251.9	—	490.5	200.1	

Zusammenstellung 33. Verdrehung der Bewehrten Körper, (g)

Drehmoment (cmkg)	Reihe 10								im Mittel
	61	62	63	64	65	66	83	84	
0-20 000	0.3	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	0	0.2	0.2
0-40 000	2.1	1.8	2.5	1.4	2.4	2.3	2.5	2.1	2.1
0-60 000	3.3	3.5	5.2	4.0	5.2	4.4	4.6	4.4	4.3
0-80 000	6.8	5.2	8.1	6.3	7.0	6.8	7.2	7.0	6.8
0-100 000	8.7	9.6	11.2	8.7	8.7	9.3	10.0	9.8	9.5
0-120 000	11.3	11.3	14.6	11.4	11.3	12.3	14.5	14.9	12.7
0-140 000	14.8	16.5	26.0	17.8	14.0	24.3	—	17.7	18.7
0-160 000	19.7	23.3	36.9	—	25.5	32.4	28.1	38.2	29.2
0-180 000	39.5	—	52.2	—	38.8	44.0	44.6	68.5	47.9
0-200 000	62.0	—	82.5	—	68.4	83.6	67.4	99.9	77.8
0-220 000	87.5	—	149.3	—	132.8	98.5	91.8	124.8	114.1
0-240 000	105.8	—	—	—	169.7	134.6	122.3	180.1	142.5
0-260 000	153.3	—	—	—	—	—	—	—	156.3
beim Riss	24.0	23.1	26.5	—	20.2	17.8	20.8	29.0	
beim Bruch	286.8	—	—	—	286.0	201.3	206.9	314.9	

Zusammenstellung 34. Verdrehung der Bewehrten Körper, (h)

Drehmoment (cmkg)	Reihe 11					im Mittel
	68	69	70	85	86	
0-20 000	0.2	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2
0-40 000	2.7	2.0	2.4	2.4	2.6	2.4
0-60 000	5.1	4.0	4.6	4.5	4.7	4.6
0-80 000	7.5	6.3	7.0	7.2	7.1	7.0

0-100 000	9.2	8.9	9.0	10.5	10.2	9.6
0-120 000	12.5	11.2	11.5	13.2	13.5	12.4
0-140 000	16.7	15.7	15.2	16.2	17.7	16.3
0-160 000	24.0	21.2	25.6	31.1	23.0	26.2
0-180 000	36.3	33.5	33.2	40.9	36.0	36.8
0-200 000	53.3	43.8	65.6	58.0	54.3	55.2
0-220 000	83.2	63.8	81.5	77.6	76.1	76.4
0-240 000	104.8	91.2	107.6	106.1	103.8	102.7
0-260 000	—	162.4	164.1	136.7	133.1	149.1
beim Riss	29.3	18.2	21.0	21.0	16.0	
beim Bruch	215.4	—	273.1	215.2	236.3	

In den obigen Zusammenstellungen zeigen die wagerechten Streife den Rissbildungsbeginn. Während Untersuchungen verliefen die Risse sehr oft unter die an Körperflächen befestigten Spiegel, die deswegen dergestalt umgedreht wurden, dass die weitere Beobachtung unmöglich war.

Abb. 57 bis 69 stellen die Beziehung zwischen Verdrehungsmoment und Verdrehungswinkel dar, bei den Körpern 94, 88, 78, 79, 55, 30, 72, 76, 71, 73, 65, 70 bzw. 87. Alle Abbildungen zeigen, dass die Linie der Verdrehungen bis zum Bruch einen stetigen Verlauf nimmt. Die Körper 65 (Reihe 10) und 70 (Reihe 11) sind die Beispiele der über die Höchstlast fortgesetzten Verdrehung.

42. Einfluss der Bewehrung auf Verdrehung.

Aus unseren Versuchsergebnissen kann man bemerken, dass die Verdrehung der Betonkörper durch Eiseneinlagen keineswegs vermindert wird; im Gegenteil ist die Verdrehung der bewehrten Körper einigermassen grösser als diejenige der unbewehrten. Bei früheren Versuchen von Bach (1911) bzw. Graf (1921) ist die Verdrehung bei den bewehrten Körpern etwas kleiner ermittelt worden, als bei den unbewehrten. Bei Versuchen von Föppl (1911) ist sie aber im Gegenteil etwas grösser bei den bewehrten Körpern als bei den unbewehrten; und diese letzten Ergebnisse stimmen genau mit unseren überein.

Jedenfalls ist es klar, dass der Einfluss des Eiseneinlagers auf die Verdrehung, ungeachtet der Bewehrungsarten, ganz unwesentlich ist. Er ist zwar merklich kleiner als es auf Grund der statischen Berechnung erwarten lässt. Die Erklärung des Verfassers für diese Ergebnisse ist schon in seinem vorigen

werk¹⁾ gegeben. Hinsichtlich der Bewehrungsarten sind die folgenden Schlüsse gemacht zu werden: 1) die Spiralbewehrung mit dem grösseren Schraubenswinkel kann auf Verzögerung der Verdrehung etwas stärker einwirken, als diejenige mit dem kleineren; 2) bei den mit Ringe bewehrten Körpern ist die Verdrehung einigermassen kleiner als bei den übrigen. Und daraus kommt, dass die Körper in Reihen 3, 6 und 8 den verhältnismässig grossen Widerstand gegen Torsion entwickeln.

Zwölfter Abschnitt. Statische Auswertung der Ergebnisse.

43. Verteilung der Schubspannungen.

Der Verfasser hat bereits aus den Ergebnissen des früheren Versuche hinsichtlich der Verteilung der Schubspannungen im Querschnitt des Torsionskörpers aus Beton einen Schluss gezogen, welcher in seinem vorigen Werk ausführlich geschildert ist. Bei vollkommen elastischen Materialien, die nur theoretisch vorhanden sind, verteilt sich die Schubspannung im Querschnitt des auf Torsion beanspruchten, kreisförmigen oder kreisringförmigen Körpers in der geraden Proportion mit dem Abstand vom Schwerpunkt des Querschnitts. Für diese Querschnitte erhält man:

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= \frac{2}{\pi} \frac{M_a}{r^3} \\ \tau_1 &= \frac{2}{\pi} \frac{M_a r}{r^4 - r_0^4} = \frac{2}{\pi} \frac{M_a}{r^3(1 - m^4)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

u. zw. bezeichnet

- τ_1 die grösste oder äusserste Spannung,
- r den äusseren Halbmesser,
- r_0 den inneren Halbmesser, und
- m das Verhältnis von $r_0 : r$.

Bei gewöhnlichen Metallen gilt die Voraussetzung der Proportionalität zwischen Spannungen und Verdrehungen, auf der die obigen Gleichungen beruhen, insoweit die Elastizitätsgrenze nicht überschritten wird; dagegen aber nicht mehr in der Nähe des Bruches, wobei die Schubspannung gleichmässig auf jeden Halbmesser verteilt werden soll. Diese Voraussetzung hat

1) s. Fussbemerkung in S. 1.

einen theoretischen Grund und stimmt genau mit den früheren Versuchsergebnissen bei Stahl, Flusseisen sowie Gusseisen überein.

Für den Bruch dieser Materialien dienen:

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= \frac{3}{2\pi} \frac{M_d}{r^3} \\ \tau_1 &= \frac{3}{2\pi} \frac{M_d}{r^3 - r_0^3} = \frac{3}{2\pi} \frac{M_d}{r^3(1-m^3)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

Nach Ansicht des Verfassers sollte sich bei spröden Materialien, wie Beton oder Stein, die Verteilung der Schubspannungen eigentlich in einer Kurve vollziehen. Da die Formänderung des Betons tatsächlich gemäss der steigenden Beanspruchung stark zunimmt, so ist es gar nicht ungereimt, diese Kurve als eine parabolische anzunehmen, die im Schwerpunkt des Querschnitts ihren Anfang hat. Unter dieser Voraussetzung ergibt sich:

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= \frac{7}{4\pi} \frac{M_d}{r^3} \\ \tau_1 &= \frac{7}{4\pi} \frac{M_d r^{\frac{1}{2}}}{r^{\frac{7}{2}} - r_0^{\frac{7}{2}}} = \frac{7}{4\pi} \frac{M_d}{r^3(1-m^{\frac{7}{2}})} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

Diese Formeln sollen weiters nach den wirklichen Versuchsergebnissen untersucht werden. Mittels der aus den Versuchen von Graf, 1921, berechneten Elastizitätszahlen, hat Mörsch graphisch das einem beliebigen Drehwinkel entsprechende Verdrehungsmoment gefunden, welches mit dem tatsächlich beobachteten Moment in befriedigender Genauigkeit übereinstimmt;²⁾ die obigen Gleichungen des Verfassers sind aber viel zweckmässiger, weil sie in der Berechnung ganz einfach und trotzdem ebenso zuverlässig sind.

Die folgende Vergleichung soll für die Bestätigung dieser Gleichungen gelten:

1) Beim kreisförmigen Querschnitt wird die Berechnung wie folgendes fortgeführt:

$$\tau = \tau_1 \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad M_d = \int \tau \cdot 2\pi \rho^2 d\rho = \frac{2\pi \tau_1}{r^{\frac{1}{2}}} \int \rho^{\frac{5}{2}} d\rho = \frac{4\pi}{7} \tau_1 r^3$$

$$\therefore \tau_1 = \frac{7}{4\pi} \frac{M_d}{r^3}$$

2) vgl. "Verdrehungsversuche zur Klärung der Schubfestigkeit von Eisenbeton," S. 39.

Zusammenstellung 35. Vergleichung der Drehmomente.

Querschnitt	Schubspannung τ_1 (kg/qcm)	von Graf beobachtet	Drehmoment (cmkg) von Mörsch graphisch gef.	vom Verfasser Gl. (4)
kreisförmig	7.7	100 000	100 750	110 600
	14.0	200 000	193 000	201 100
	16.0	233 000	220 000	229 800
kreisringförmig	7.6	100 000	—	88 100
	12.6	145 800	141 200	146 000

Was die niedrige Spannungsstufe wie beim Moment von 100 000 cmkg betrifft, so weichen die aus den Gleichungen berechneten Werte bedeutend von den beobachteten ab, dagegen stimmen sie beim Bruch mit den wirklichen Versuchsergebnissen genau überein. Das ist selbstverständlich und von vornherein zu erwarten, weil Gl. (4) abgeleitet worden ist, nur beim Bruch zu gelten, und für das niedrige Drehmoment kann näherungsweise Gl. (2) gebraucht werden.

Die durch Gl. (2) bis (4) angegebenen Schaulinien der Spannungsverteilung lassen sich in Abb. 70 vergleichen.

Bei den nach **20.** Ziffer 1) beanspruchten unbewehrten Körpern, ergab sich durchschnittlich das Bruchmoment $M_a = 120\,860$ cmkg, womit die grösste Schubspannung¹⁾ des Betons beim Bruch nach Gl. (4) berechnet werden konnte:

$$\tau_1 = \frac{7}{4\pi} \frac{120\,860}{15.00^3} = 19.9 \text{ kg/qcm};$$

und bei den nach **20.** Ziffer 2) beanspruchten Körpern, wurde das Bruchmoment ermittelt, $M_a = 98\,400$ cmkg, das der Schubspannung¹⁾ entspricht:

$$\tau_1 = \frac{7}{4\pi} \frac{98\,400}{14.97^3} = 16.3 \text{ kg/qcm}.$$

Die numerische Beziehung zwischen diesen Schubspannungen und der Verdrehungsfestigkeit kann hier mangels Versuche auf Elastizitätseigenschaften des Betons nicht klar zum Ausdruck gebracht werden. Als Ursache des Bruches der Torsionskörper kann aber ohne weiteres die schräge Hauptzugspannung, und nicht die Schubspannung angesehen werden, da die letztere wie oben angeführt bedeutend geringer als die Schubfestigkeit des Betons ermittelt wurde. Vgl. Zusammenstellung 8.

1) abgesehen von der Reibung der Maschinenteile.

44. Schubelastizität des Betons.

Bei allen früheren Versuchen berechnete man ohne Ausnahme den Schubelastizitätsmodul G aus der elastischen Beziehung zwischen Drehmoment M_d und Verdrehung θ oder Verschiebung φ_1 , die laut folgenden Formen miteinander zusammenhängen:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \frac{\varphi_1}{r}, & G &= \frac{\tau_1}{\varphi_1} = \frac{\tau_1}{\theta r} \\ \tau_1 &= \frac{2}{\pi} \frac{M_d}{r^3}, & G &= \frac{2}{\pi} \frac{M_d}{\theta r^4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

Diese Gleichungen sollen aber nicht unbedingt für Betonkörper angewendet werden, da sie auf Voraussetzung der geradlinigen Spannungsverteilung gegründet sind. Unter der niedrigen Beanspruchung gilt wahrscheinlich Gl. (5), aber unter der gesteigerten Beanspruchung, besonders in der Nähe des Bruches, wie geschildert in 43., verteilt sich die Schubspannung im kreisförmigen Querschnitt parabolisch, und daraus folgt:

$$\tau_1 = \frac{7}{4\pi} \frac{M_d}{r^3}, \quad G = \frac{7}{4\pi} \frac{M_d}{\theta r^4} \dots\dots\dots(6)$$

Die folgenden Elastizitätsmoduln wurden aus den Versuchsergebnissen durchwegs mittels Gl. (6) berechnet, wovon sich die erste Gruppe auf die gesamten Verdrehungen bezieht, und die zweite Gruppe auf die federnden oder elastischen Verdrehungen.¹⁾

Zusammenstellung 36. Schubelastizitätsmodul.

Belastungsstufen M_d (cmkg)	τ_1 (kg/qcm)	bei Körpern θ (10^{-6})	90,93-95 G (kg/qcm)	bei Körpern θ (10^{-6})	88,89,91,92 G (kg/qcm)
20 000	3.3	1.5	146 900	1.6	137 800
40 000	6.6	3.1	142 100	3.3	133 600
60 000	9.9	4.9	136 500	5.4	122 500
80 000	13.3	6.8	120 600	8.2	111 600
100 000	16.6	9.0	122 400		

1) Damit der Einfluss der Maschinenreibung auf Verdrehung in der Berechnung des Schubelastizitätsmoduls ausgeschlossen werden soll, nehmen wir $M_d=20\,000$ cmkg als Anfang der reinen Verdrehung.

45. Rissbildungsmoment.

Ist das Rissbildungsmoment bei bewehrten Körpern höher als bei unbewehrten, dann ist das Mehr ohne weiteres auf die Wirkung der Bewehrung zurückzuführen. Die Analyse, die Mörsch in Bezug auf das Rissbildungsmoment der bewehrten Körper 1904 veröffentlicht hat, beruht auf irrtümliche Theorien.¹⁾ Es ist klar, dass die unter 45° gerichtete schräge Zugkraft und die dazu senkrechte schräge Druckkraft zusammen mit dem ausgeübten Drehmoment das Gleichgewicht halten, ohne Rücksicht darauf, dass diese Zugkraft entweder durch Beton oder Eisen entwickelt wird. Demnach soll eine gemeinschaftliche statische Beziehung ebenso nach wie vor Eintritt der Risse gelten. Trotzdem kommt in der oben angeführten Analyse von Mörsch die durch Beton entwickelte Druckkraft nicht in Betracht.

Dagegen müssen die Theorien, veröffentlicht im vorigen Werk des Verfassers, hinsichtlich der Eiseneinwirkung beim Bruch des Torsionskörpers, auch beim Riss verwendbar sein. Die Analyse ist wie folgt, Abb. 71.

1) Einfache Spiralen.

Besteht die Bewehrung des Torsionskörpers aus Spiralen, die mit dem Schraubenwinkel von β derart eingelegt sind, dass sie bei Torsion auf Zug beansprucht wird, so ergeben sich die nachstehenden Gleichungen:

$$\Delta M_a = S r_1, \quad S = 2Z' \sin \frac{\pi}{4} = 2D \sin \frac{\pi}{4}, \quad Z = \sigma_e z f_e$$

$$\left. \begin{aligned} Z' \sin \frac{\pi}{4} &= Z \sin \beta, & \beta &\leq \frac{\pi}{4} \\ Z' \cos \frac{\pi}{4} &= Z \cos \beta, & \beta &\geq \frac{\pi}{4} \end{aligned} \right\}$$

woraus

$$\left. \begin{aligned} \sigma_e &= \frac{\Delta M_a}{2 \sin \beta z r_1 f_e}, & \beta &\leq \frac{\pi}{4} \\ \sigma_e &= \frac{\Delta M_a}{2 \cos \beta z r_1 f_e}, & \beta &\geq \frac{\pi}{4} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

Hierin bedeutet

ΔM_a Differenz der Rissbildungsmomente zwischen den bewehrten und unbewehrten Körpern,

S horizontale Umfangskraft, die eine Resultante von Z' und D ist,

D Druckspannung des Betons,

1) vgl. "Schub- und Scherfestigkeit des Betons," Schweizerische Bauzeitung, 1904, S. 295 ff.

- Z : Zugspannung der gesamten Bewehrung,
 Z' : effektive Komponent von Z ,
 r_1 : Halbmesser des Bewehrungskreises,
 z : Zahl der Eisen im Querschnitt des Körpers,
 f_e : Querschnittsinhalt eines Eisens, und
 σ_e : Eisenbeanspruchung.

Für die unter 45° ansteigenden Spiralen, wird Gl. (7) wie folgt umgebildet:

$$\sigma_e = \frac{0.7074M_a}{zr_1f_e} \dots \dots \dots (8)$$

Für die unter 30° und 60° gerichteten Spiralen gilt wohl dieselbe Gleichung, d. i.

$$\sigma_e = \frac{4M_a}{zr_1f_e} \dots \dots \dots (9)$$

2) Längseisen und Ringe.

Während die allein eingelegten Längseisen oder Ringe einflusslos bleiben, können die mit dem gleichen Abstand zusammengesetzten Längs- und Ringeisen einigermassen an dem Torsionswiderstand teilnehmen. Ersetzt man $\beta=0$ oder 90° in Gl. (7), so ergibt sich

$$\sigma_e = \frac{0.54M_a}{zr_1f_e} \dots \dots \dots (10)$$

worin z für die Ringe mittels der Formel $z=2\pi r_1/t$ berechnet werden soll. Die Ringe folgen aufeinander in Abständen t .

3) Spiralen mit Längseisen oder Ringe.

Entweder Längseisen oder Ringe, die mit den 45° -Spiralen zusammengelegt sind, müssen theoretisch überflüssig sein, und deswegen können sie eigentlich kaum einen Einfluss auf das Drehmoment haben. Infolgedessen soll Gl. (8) bei Körpern in Reihe 5 und 6 ebenso wie in Reihe 2 benützt werden. Weicht der Schraubenwinkel β der Spiralbewehrung von 45° ab, dann wird sich die Beziehung der Zusammenwirkungen der Spiralen und Längs- bzw. Ringeisen verändern.

Wie der Verfasser schon aufmerksam gemacht hat, und wie man auch aus Gl. (7) bemerken kann, nimmt die Wirksamkeit des Eisens dann ab, wenn der Schraubenwinkel der Spiralen von 45° abweicht. Damit die Wir-

kungsverminderung solcher Bewehrungen wieder erlangt werden kann, sollen Längseisen für 60°-Spiralen beigefügt werden, und Ringe für 30°-Spiralen. Da die Komponente der Zugkraft der Spiralen vom Schraubenwinkel β in der Horizontal- bzw. Vertikalrichtung durch $Z \sin \beta$ bzw. $Z \cos \beta$ bezeichnet wird, fehlt dazu eine Kraftkomponente $Z (\cos \beta - \sin \beta)$ bzw. $Z (\sin \beta - \cos \beta)$ in der dazu senkrechten Richtung gemäss $\beta \leq \frac{\pi}{4}$ bzw. $\beta \geq \frac{\pi}{4}$, dass die Spiralen den grössten Einfluss auf den Torsionswiderstand entwickeln können, Abb. 72.

Wie vorher angegeben, sind die grössten überschreitenden Drehmomente

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_a &= 2zr_1 \sigma_e f_e \cos \beta, & \beta &\leq \frac{\pi}{4} \\ \Delta M_a &= 2zr_1 \sigma_e f_e \sin \beta, & \beta &\geq \frac{\pi}{4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

Das Mehr dieser überschreitenden Momente über diejenigen in Gl. (7), gesetzt ΔM_a , muss ohne weiteres durch Ringe bzw. Längseisen widerstanden werden, d. i.

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 M_a &= 2zr_1 \sigma_e f_e (\cos \beta - \sin \beta) \\ &= \Delta M_a (1 - \tan \beta), & \beta &\leq \frac{\pi}{4} \\ \Delta_1 M_a &= 2zr_1 \sigma_e f_e (\sin \beta - \cos \beta) \\ &= \Delta M_a (1 - \cot \beta), & \beta &\geq \frac{\pi}{4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

Um die Beanspruchungen der Längseisen und Ringe zu finden, ist $\Delta_1 M_a$ in den obigen Formeln an Stelle von ΔM_a in Gl. (10) eingesetzt zu werden. Sind die Spiralen vom Schraubenwinkel $\beta \leq \frac{\pi}{4}$ mit Ringen zusammen eingelegt, so ergibt sich:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_e &= \frac{0.5 \Delta M_a}{\cos \beta z r_1 f_e} \\ \sigma_2 &= \frac{0.5 (1 - \tan \beta) \Delta M_a}{z_2 r_1 f_2} \end{aligned} \right\} \beta \leq \frac{\pi}{4} \dots\dots\dots (13)$$

worin f_2 Querschnittsinhalt der Ringe, t_2 ihr Abstand, σ_2 ihre Beanspruchung, und $z_2 = 2\pi r_1 / t_2$ ihre Zahl¹⁾ bedeutet.

Sind die Spiralen vom Schraubenwinkel $\beta \geq \frac{\pi}{4}$ mit Längseisen vereinigt, so ergibt sich:

1) nicht wirklicher, sondern umgerechneter Wert.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_e &= \frac{0.5 \Delta M_a}{\sin \beta z r_1 f_c} \\ \sigma_1 &= \frac{0.5(1 - \cot \beta) \Delta M_a}{z_1 r_1 f_1} \end{aligned} \right\} \beta \geq \frac{\pi}{4} \dots \dots \dots (14)$$

worin f_1 Querschnittsinhalt der Längseisen, t_1 ihr Abstand, σ_1 ihre Beanspruchung, und $z_1 = 2\pi r_1 / t_1$ ihre Zahl bedeutet. Wir werden zunächst diese Formeln zu den vorliegenden Versuchsergebnissen anwenden.

Setzt man $\beta = 30^\circ$ in Gl. (13) ein, so bekommt man

$$\left. \begin{aligned} \sigma_e &= \frac{0.577 \Delta M_a}{z r_1 f_c} \\ \sigma_2 &= \frac{0.211 \Delta M_a}{z_2 r_1 f_2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (15)$$

Setzt man dagegen $\beta = 60^\circ$ in Gl. (14), so ergibt sich

$$\left. \begin{aligned} \sigma_2 &= \frac{0.577 \Delta M_a}{z r_1 f_c} \\ \sigma_1 &= \frac{0.211 \Delta M_a}{z_1 r_1 f_1} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (16)$$

Gl. (15) bzw. (16) soll bei Körpern in Reihe 8 bzw. 7 angewendet werden.

4) Doppelte Spiralen.

Vorher hat der Verfasser eine Formel hinsichtlich der doppelten Spiralen angegeben, die auf Voraussetzung gegründet ist, dass die Eisenbeanspruchung sich gemäss dem Abstand von der Körperachse verändert. Unsere Versuche haben in Bezug darauf interessante und lehrreiche Ergebnisse geliefert. Vergleicht man 2 überschreitende Rissbildungsmomente, d. i. $\Delta M_a = 28\,140$ cmkg bei Körpern in Reihe 10, und $\Delta M_a = 20\,740$ cmkg bei Körpern in Reihe 2, so beträgt der Überschuss des ersteren gegenüber den letzteren $\Delta_1 M_a = 7\,400$ cmkg, der ohne weiteres durch die inneren Spiralen übertragen werden sollte.

Damit die Beanspruchung in den inneren Spiralen berechnet werden kann, muss der oben gefundene Momentsüberschuss $\Delta_1 M_a$ an Stelle von ΔM_a in Gl. (8) eingesetzt werden. Man bekommt also:

$$z = 5, \quad r_1 = 8.57 \text{ cm.} \quad f_c = 0.325 \text{ qcm,} \quad \Delta M_a = 7\,400 \text{ cmkg,}$$

$$\therefore \sigma_e = 377 \text{ kg/qcm.}$$

Dagegen wurde die Beanspruchung in den äusseren Spiralen mit $\sigma_e = 539$ kg/qcm ermittelt. Das Verhältnis zwischen diesen Beanspruchungen beträgt $377 : 539 = 0.70$, welches mit demjenigen zwischen 2 Halbmessern, d. i.

8.57 : 12.0 = 0.71, genau übereinstimmt. Demnach ist die Richtigkeit unserer vorigen Formel anzuerkennen, d. i.

$$\sigma_e = \frac{0.707 \Delta M_a}{r_1 f_a [z_1 + z_2 (r_2/r_1)^2]}, \quad \sigma_e' = \sigma_e (r_2/r_1) \quad \dots \dots \dots (17)$$

worin r_1, r_2 Halbmesser, σ_e, σ_e' Eisenbeanspruchung, und z_1, z_2 Zahl der äusseren bzw. inneren Spiralen bezeichnet.

In der nachstehenden Zusammenstellung können die mittels der oben abgeleiteten Formeln berechneten Eisenbeanspruchungen miteinander verglichen werden:

Zusammenstellung 37. Eisenbeanspruchung beim Riss.

Körper in Reihe	ΔM_a (cmkg)	Eisenbeanspruchung		σ_e (kg/qcm) Längseisen	Ringe
		äuss. Spiral.	inn. Spiral.		
2	20 740	539	—	—	—
3	17 040	877	—	—	—
4	10 440	298	—	—	—
5	23 540	612	—	—	—
6	33 900	1 013	—	—	—
7	20 940	622	—	114	—
8	31 090	513	—	—	170
9	0	—	—	0	0
10	28 140	536	383	—	—
11	29 140	555	396	—	—
Durchschnitt		618	390	114	170

Diese durchschnittliche Eisenbeanspruchung der Spiralen beträgt etwa 16 vH. der Zugfestigkeit des Eisens, $K_s = 3\,900$ kg/qcm, und rd. 50-mal derjenigen des Betons, $K_z = 12.4$ kg/qcm.

Diese Ergebnisse werden wie folgt kurz zusammengefasst: 1) die Spiralbewehrung wird um so stärker gemäss der Vermehrung von β beansprucht; 2) die den Spiralen hinzugefügten Längseisen und Ringe vermögen Eintritt des Risses verzögern, selbst wenn $\beta = 45^\circ$; 3) aus diesem Grunde sind Ringe viel zweckmässiger als Längseisen; 4) die Eisenbeanspruchung in den Körpern der Reihe 6 ist ausgeprägt höher, als in den übrigen ermittelt wurde, infolge davon, dass die darin eingelegten Ringe, ungeachtet ihres tatsächlichen Vermögens, das Aufdrehen des Körpers zu hindern, nicht in Betracht gezogen wurden; 5) die vereinigte Längs- und Ringbewehrung kann kaum oder keineswegs auf Zug beansprucht werden; und 6) die Beanspruchung der

Bewehrung verändert sich im Verhältnis ihres Abstands von der Körperachse.

46. Bruchmoment.

Wie schon erörtert, soll dieselbe Analyse für Rissbildung und Bruch gelten. Deswegen können Gl. (7) bis (17) auch beim Bruch angewendet werden, um die Eisenbeanspruchung zu berechnen, mit der Einsetzung von M_a , d. i. Bruchmoment anstatt von $4M_a$ in diesen Gleichungen.

Es ergeben sich daher folgende Resultate:

Zusammenstellung 38. Eisenbeanspruchung beim Bruch.

Körper in Reihe	M_a (cmkg)	Eisenbeanspruchung σ_s		(kg/qcm) Längseisen	Ringe
		äuss. Spiral.	inn. Spiral.		
2	191 900	4 986	—	—	—
3	189 250	9 735	—	—	—
4	177 850	5 083	—	—	—
5	201 050	5 227	—	—	—
6	209 800	5 450	—	—	—
7	201 200	5 972	—	1 092	—
8	208 600	3 451	—	—	1 141
9	135 130	—	—	1 737	1 737
10	249 850	4 876	3 462	—	—
11	263 830	5 148	3 655	—	—
12	128 400	—	6 539	—	—
Durchschnitt		5 547	4 552	1 415	1 439

Bei den Körpern in Reihen 10 und 11 wurde es gefunden, dass die Beanspruchung der inneren Spiralen, gerechnet in der gleichen Weise wie beim Riss, mit derjenigen der äusseren ein Verhältnis von $2\,951 : 4\,986 = 0,59$ betrug. Aber auch für Bruch wurde Gl. (17) annähernd benützt.

Die Beanspruchung der Spiralen ist mit einigen Ausnahmen bedeutend höher als die Zugfestigkeit des Eisens. Das erscheint etwas vernunftwidrig, insbesondere wenn man die Tatsache in Betracht zieht, dass alle Arten von Bewehrungen bei Versuchen nicht zum Bruch beansprucht worden sind. Die Erklärung für diese Ergebnisse ist nicht so schwer zu geben. Da die für die Berechnung vorher abgeleiteten Formeln unter der Voraussetzung gemacht sind, dass die Druckkraft des Betons sich in der Bewehrungslinie konzentriert und demnach mit der Zugkraft des Eisens das Gleichgewicht hält, so treffen sie bloss für den bewehrten Hohlzylinder zu, und nur näherungsweise können sie für den Vollzylinder gebraucht werden, wie dies bei unseren

Versuchen der Fall ist.

Tatsächlich kann die Zugkraft des Betons im Vollzylinder beim höchsten Drehmoment noch nicht erschöpft werden, und es ist auf Grund der oben zusammengestellten Zahlen selbstverständlich, dass Drehmoment mit der Vernichtung dieser Zugkraft zurückzieht, selbst wenn die Bewehrung zur Zerstörung beansprucht werden soll. Infolgedessen können unsere Formeln mit mehrerer Sicherheit für die Berechnung der auf Torsion zu beanspruchenden Körper verwendet werden.

Die Zusammenfassung, angegeben am Ende des vorhergehenden Paragraph, in Bezug auf die Einwirkung der verschiedenen Bewehrungen beim Riss ist die gleiche wie für diejenige beim Bruch.

47. Schluss.

Auf Grund der aus unseren Versuchen gewonnenen Resultate kann man die Torsionseigenschaften bei bewehrten und unbewehrten Betonkörpern und die Wirkung der verschiedenen Bewehrungen wie folgt zusammenfassen:

1) Die Schubspannung im runden Querschnitt des Betonkörpers verteilt sich parabolisch auf jeden Halbmesser.

2) Der Bruch des unbewehrten Körpers und die Risse des bewehrten finden ohne Ausnahme in einer unter etwa 45° ansteigenden Schraubenlinie statt.

3) Unter den Körpern in Reihen 2 bis 4, wo eine gleiche Eisenmenge gebraucht wird, ist die 45° -Spiralbewehrung am stärksten, gesehen vom ökonomischen Standpunkt aus.

4) Die 30° -Spiralbewehrung ist dagegen am schwächsten, während die 60° -Spiralbewehrung dazwischen liegt.

5) Obwohl die 60° -Spiralen am stärksten beansprucht werden können, vermögen sie für die gleiche Eisenmenge in Längeneinheit nicht den gleich grossen Widerstand wie die 45° -Spiralen zu entwickeln.

6) Die den 45° -Spiralen hinzugefügte Längs- bzw. Ringbewehrung kann einigermassen den Torsionswiderstand erhöhen, wenn ihre statische Wirkung auch nicht der Berechnung unterworfen werden kann.

7) Die Ringe können in diesem Falle das Aufdrehen des Körpers stärker als die Längseisen ausschliessen, d. i., für Erhöhung der Torsionswiderstandsfähigkeit sind die ersteren viel einflussreicher.

8) Die 60° -Spiralen werden wieder aus der verminderten Wirkung durch

den Zusatz der erforderlichen Längseisen erlangt; und die 30°-Spiralen durch denjenigen der Ringe.

9) Unter den Körpern in Reihen 5 bis 8, wo eine gleiche Eisenmenge benützt wird, kann die gesamte Eisenwirkung nicht merklich voneinander verschieden sein, indessen wird diejenige der Körper in Reihen 6 und 8, wo Ringe eingelegt sind, etwas höher ermittelt.

10) Die vereinigte Längs- und Ringbewehrung kann den Einfluss auf Torsionskörper nicht wesentlich entwickeln, da die Eisen dabei am schwächsten beansprucht werden.

11) Bei den Körpern in Reihe 10, worin die doppelten 45°-Spiralen eingelegt sind, ist der Widerstand gegen Torsion am grössten, ungeachtet der geringeren Eisenmenge wie bei Reihen 5 bis 8; diese Körper sind die zweckmässigsten, wenn man den auf Zug beanspruchten Beton gleichmässig zu entlasten beabsichtigt.

12) Der einzige Nachteil bei diesen Körpern ist, dass die inneren Spiralen nicht ebenso hoch wie die äusseren beansprucht werden können, da sich die Eisenbeanspruchung geradlinig gemäss dem Abstand von der Körperachse verändert.

13) Bei den Körpern in Reihe 11, wo den doppelten Spiralen die Längseisen hinzugefügt sind, wird der Torsionswiderstand noch höher als derjenige in Reihe 10 gesteigert.

14) Beim höchsten Moment wird die Zugkraft des Betons noch nicht erschöpft, und gleichzeitig die Bewehrung noch nicht zur Zerstörung beansprucht. Demnach wird das ausgeübte Drehmoment teilweise durch Beton und Eisen widerstanden.

15) Unsere Formeln für die Berechnung der Torsionskörper, die hauptsächlich für den Hohlzylinder zutreffend sind, können näherungsweise für den Vollzylinder angewendet werden.

16) Für den Körper, der auf Druck und Torsion beansprucht wird, wie dies in den Schraubenpfählen der Fall ist, ist in erster Linie die Bewehrung wie in Reihe 5 oder 7 zu empfehlen.

17) Für den auf Torsion allein beanspruchten Körper, ist die Bewehrung erstens in Reihe 2, 10 bzw. 11, und zweitens in Reihe 6 bzw. 8 geeignet.

Dreizehnter Abschnitt. Nachtrag.

48. Druckversuche der Torsionskörper.

In wirklichen Eisenbetonkonstruktionen kommen keine Bauteile vor, die stets auf Torsion beansprucht werden; sondern findet die Torsionsbeanspruchung in den meisten Baukonstruktionen zeitweilig statt. Zum Beispiel, tragen die Eisenbetonschraubenpfähle eigentlich die Druckkraft, aber während des Einschraubens sollen sie auf Torsion beansprucht werden. Aus diesem Grunde wurden unsere Torsionskörper nach Verdrehungsversuchen für Druck angeboten. Aus Reihen 2 bis 11, wurden je 2 Körper für diesen Zweck ausgewählt. Alle Körper wurden beim Alter von ungefähr 112 Tagen oder 16 Wochen in einer stehenden Druckmaschine von M A N mit der Fähigkeit von 1 000 000 kg unterworfen. Die zur Prüfung angebotenen Körper erschienen noch unbeschädigt. Zahlreiche Risse verliefen auf ihre Mantelfläche, aber der äusserhalb der Bewehrung gelegene Beton gar nicht lose. Trotzdem muss es unvernünftig sein, bei der Berechnung der Festigkeit des Körpers die ganze Querschnittsfläche $F_0 = \frac{\pi}{4} r^2 = 706.9 \text{ qcm}$, in Betracht zu ziehen. Aus diesem Grunde wird es angenommen, dass der innerhalb der Bewehrung gelegene Beton allein wirksam ist.

Mangels Druckversuche mit den unbewehrten Körpern¹⁾ ist es unmöglich, die Eisenbeanspruchung in allen Körpern zu berechnen, und weiter die Wirkung der verschiedenen Bewehrungsarten klar zum Ausdruck zu bringen. Diese Umstände regen an, weitere, erneuerte Untersuchungen geplant zu werden.

Die Versuchsergebnisse sind unten zusammengestellt:

Zusammenstellung 39. Druckversuche.

Reihe	Körper	Prüfungstag ²⁾	Alter (Tage)	Eisenverhältnis ³⁾ (vH) Längseisen Spiral. u. Ringe	Höchst- last (kg)	Drückfestigkeit ⁴⁾ k_c (kg/qcm)
-------	--------	---------------------------	-----------------	---	----------------------	---

1) Alle unbewehrte Körper waren bei Torsion derart zerbrochen, dass die weiteren Druckversuche dabei ausgeschlossen waren.

2) Hinsichtlich der Herstellungstage dieser Körper, vgl. Zusammenstellungen 11-13, 15-19, 21 u. 22.

3) gerechnet mittels der Zusammenstellung 2, der effektiven Querschnittsfläche des Körpers, $F = \pi r^2 / 4 = 452.4 \text{ qcm}$, zugrunde liegend.

4) abgesehen von dem Eigengewicht, d. i. Höchstlast dividiert durch die effektive Querschnittsfläche, $F = 452.4 \text{ qcm}$.

2	43	11.12.26	112	—	0.709	86 000	190
	44	11.12.26	112	—	0.709	90 400	200
3	49	14.12.26	112	—	0.716	118 500	262
	51	14.12.26	111	—	0.716	100 600	222
4	55	17.12.26	112	—	0.745	92 300	204
	56	17.12.26	112	—	0.745	65 300 ¹⁾	144
5	29	4.12.26	112	0.716	0.709	99 000	219
	30	4.12.26	112	0.716	0.709	94 500	209
6	9	24.11.26	112	—	1.418	107 500	238
	10	24.11.26	112	—	1.418	138 000	304
7	37	8.12.26	112	0.716	0.716	87 000 ²⁾	192
	38	8.12.26	112	0.716	0.716	87 000 ²⁾	192
8	15	27.11.26	112	—	1.454	139 000	307
	16	27.11.26	112	—	1.454	126 400	279
9	23	1.12.26	112	0.716	0.709	143 200	316
	24	1.12.26	112	0.716	0.709	124 000	274
10	61	20.12.26	112	—	1.217	95 700	211
	62	20.12.26	112	—	1.217	99 000	219
11	67	23.12.26	112	0.859	1.217	95 800	212
	68	23.12.26	112	0.859	1.217	110 000	243

Aus diesen lehrreichen Ergebnissen kann man deutlich folgendes bemerken: 1) je grösser der Schraubenwinkel β , desto wirksamer die Spiralbewehrung; 2) Längseisen nehmen am geringsten an dem Druckwiderstand teil, wie von vornherein erwartet; 3) dagegen können Ringe die grösste Festigkeit im Körper entwickeln; 4) Körper in Reihen 10 und 11, worin doppelte Spiralen benützt wurden, sind am besten für Torsion geeignet, trotzdem kann die darin eingelegte Spiralbewehrung nicht so grossen Druckwiderstand entwickeln; 5) Dagegen ist der Torsionswiderstand der Körper in Reihe 9 mit sowohl Längseisen als auch Ringen am geringsten, indessen ist ihr Druckfestigkeit die grösste.

Es ist sehr interessant diese Ergebnisse noch weiter zu forschen. Man pflegt die Spiralbewehrung für viel wirksamer als Ringe zu halten. Dies stimmt mit den Ergebnissen der früheren Versuche überein, aber ist im Widerstreit mit unseren. In der Tat, sind die gewöhnlich in Betracht kommenden Spiralen ganz platt, wie dies bei der Considèreschen Spiralbewehrung

1) Dieses Ergebnis ist unzuverlässig.

2) viel kleiner als erwartet auf Grund der Ergebnisse der Körper 49 und 51 in Reihe 3.

für Säulen der Fall ist; deshalb muss die Einwirkung solcher steilen Spiralen wie unsere von neuem erforscht werden.

Es ist klar, dass der Koeffizient, welcher das Verhältnis der Wirksamkeit zwischen Spiralen und Längseisen bedeutet, vom Schraubenwinkel β der ersteren abhängig sein muss. Der von Considère bestimmte Koeffizient 2.4 soll demnach für die Spiralen mit dem kleineren Schraubenwinkel berichtigt werden.

49. Berechnung der Schraubenpfähle.

Aus den Ergebnissen der oben geschilderten Druckversuche, ist es bemerkbar, dass die am besten zutreffende Bewehrung für die auf Druck zu beanspruchenden Körper die Spiralen mit dem möglich grössten Schraubenwinkel sein muss. Dies stimmt nicht mit der Forderung von der Torsionsbeanspruchung überein, wobei 45°-Spiralen am besten geeignet sind.

Aus diesem Grunde empfiehlt der Verfasser für die Eisenbetonschraubenpfähle in der ersten Linie solche Bewehrungsarten wie in Reihen 5 (45°-Spiralen und Längseisen), 6 (45°-Spiralen und Ringe), 7 (60°-Spiralen und Längseisen), 8 (30°-Spiralen und Ringe) und 11 (doppelte 45°-Spiralen und Längseisen).

Während des Einschraubens wirkt ein Reibungswiderstand infolge des Erddrucks längs der ganzen Mantelfläche des Pfahls ein. Nach den Rankineschen Theorien wird dieser Erddruck durch die folgende Gleichung dargestellt:

$$D = \pi r g l^2 \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \dots \dots \dots (18)$$

Hierin bezeichnet

- D Erddruck auf die Mantelfläche des Pfahls,
- r Halbmesser des Querschnitts,
- l Länge des Pfahls unter Boden,
- g Raumbgewicht der Erde, und
- φ Reibungswinkel der Erde, Abb. 73.

Diese Gleichung wurde abgeleitet, abgesehen von dem Einfluss des Schraubenschuhes. Nimmt man zunächst f ein Reibungskoeffizient zwischen Erde und Betonfläche an, so ergibt sich der Reibungswiderstand

$$F = fD = \pi r f g l^2 \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \dots \dots \dots (19)$$

und das dadurch entwickelte Moment wird

$$M_a = Fr = \pi r^2 f g l^2 \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \dots \dots \dots (20)$$

Der Verdrehungswiderstand des Schraubenpfahls soll eigentlich nicht kleiner als M_a in Gl. (20) sein. In Bezug auf das Raumgewicht g , können wir durchschnittlich $g = 1\ 600\ \text{kg/m}^3$ annehmen. Hinsichtlich der Reibungswinkel φ und des Reibungskoeffizient f , können wir auch auf die zahlreichen, früheren Versuchsergebnisse, insbesondere auf diejenige von A.T. Goldbeck¹⁾ zählen. Auf Grund dieser Ergebnisse wählen wir als unserer Berechnung erforderliche Reibungszahlen die folgenden Werte :

Zusammenstellung 40. Reibungszahlen.

Erd	Reibungswinkel φ	$\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$	Reibungskoeff. f	$f \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$
Ton	26°-30'	0.383	0.30	0.11
Sand	33°-40'	0.286	0.45	0.13
Kies	36°-50'	0.250	0.60	0.15

Dann wird Gl. (20) wie folgt umgebildet :

$$\left. \begin{aligned} M_a &= C r^2 l^2, \quad M_a \text{ in cmkg, } r \text{ in cm, und } l \text{ in m} \\ C &= 5.5 \quad \text{für Ton} \\ &= 6.5 \quad \text{für Sand, und} \\ &= 7.5 \quad \text{für Kies.} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (21)$$

Nimmt man für Schraubenpfähle dieselbe Bewehrungsart wie in Reihe 7, d.i. 60°-Spiralen und Längseisen an, dann ergibt sich die folgenden Gleichungen aus Gl. (16) :

$$\left. \begin{aligned} M_a &= 1.732 \pi r_1 k_e f_e \\ M_a &= 4.739 \pi r_1 k_e f_i \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (22)$$

Mittels dieser Gleichungen kann die Berechnung der Eisenbetonschraubenpfähle sehr leicht ausgeführt werden. Die Längseisen sollen auf Grund der Normal- bzw. Biegekraft berechnet werden, insofern die zweite Formel in Gl. (22) damit genügt wird.

Unsere Berechnung wurde beispielweise auf Annahme von der zulässigen Eisenspannung $k_e = 1\ 000\ \text{kg/qcm}$ ausgeführt, und unten zusammengestellt :

1) vgl. "Frictional Tests of Concrete on Various Sub-grades", Public Roads, Vol. 5, No. 5, Juli, 1924. S. 19; The Highway Engineer and Contractor, Aug. 1924, S. 29.

Zusammenstellung 41. Berechnung der Schraubenpfähle.

	Erd Länge l (m)	Halbmesser		60°-Spiralen				Längseisen			
		r (cm)	r_1 (cm)	D (cm)	f_s (qcm)	z	t (cm)	D_1 (cm)	f_1 (qcm)	z_1	t_1 (cm)
Ton	5	15	12	0.95	0.712	3	14.5	19.05	2.850	6	12.6
	6	17.5	14.5	0.95	0.712	4	13.1	19.05	2.850	8	11.4
	7	20	17	0.95	0.712	5	12.3	19.05	2.850	10	10.7
	8	22.5	19.5	1.27	1.267	5	14.1	19.05	2.850	12	10.1
Sand	5	15	12	0.95	0.712	3	14.5	19.05	2.850	6	12.6
	6	17.5	14.5	0.95	0.712	4	13.1	19.05	2.850	8	11.4
	7	20	17	0.95	0.712	6	10.3	19.05	2.850	10	10.7
	8	22.5	19.5	1.27	1.267	5	14.1	19.05	2.850	12	10.1
Kies	5	15	12	0.95	0.712	3	14.5	19.05	2.850	6	12.6
	6	17.5	14.5	0.95	0.712	5	10.5	19.05	2.850	8	11.4
	7	20	17	0.95	0.712	7	8.8	19.05	2.850	10	10.7
	8	22.5	19.5	1.27	1.267	6	11.5	19.05	2.850	12	10.1

Tokio, Ende Dezember, 1926.

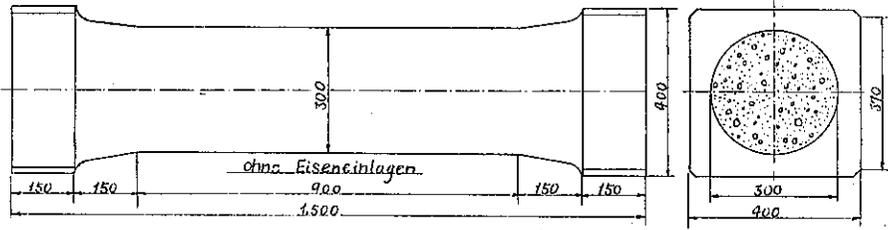


Abb. 1

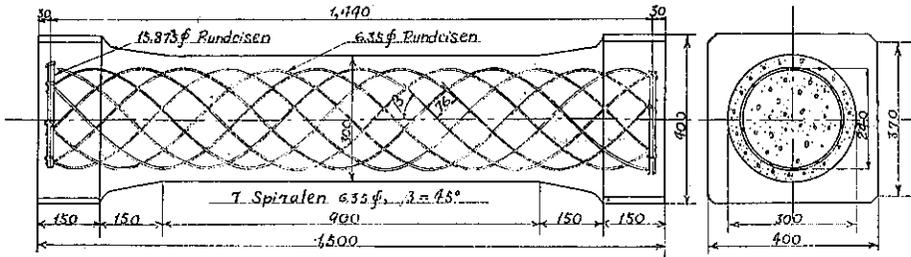


Abb. 2

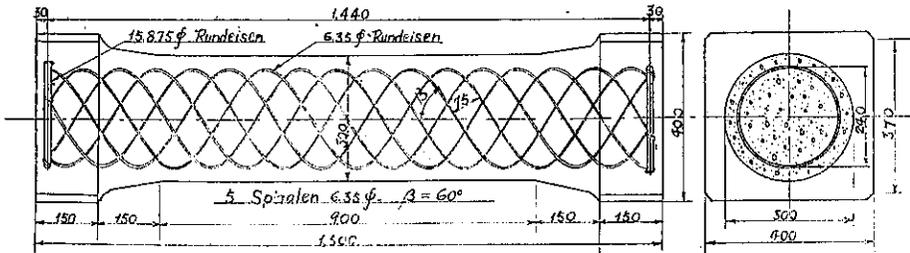


Abb. 3

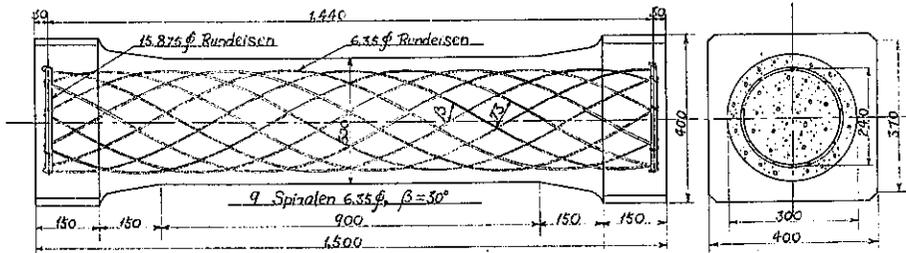


Abb. 4

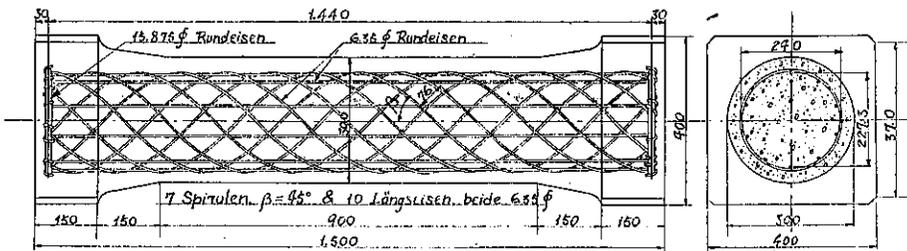


Abb. 5

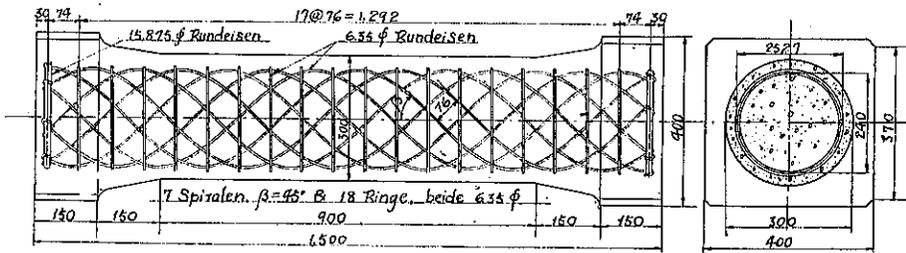


Abb. 6

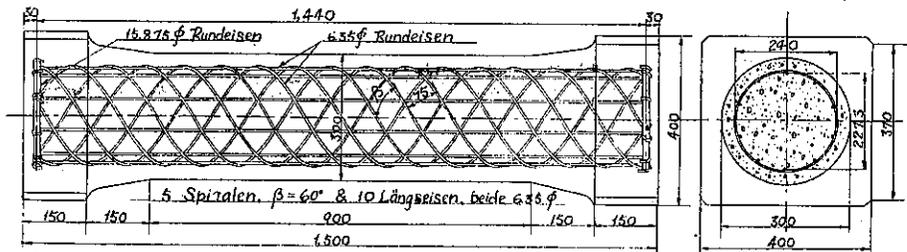


Abb. 7

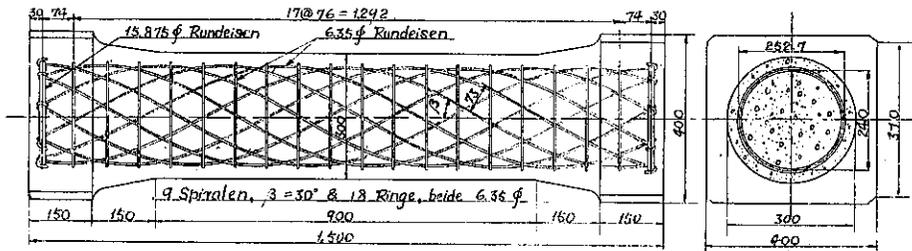


Abb. 8

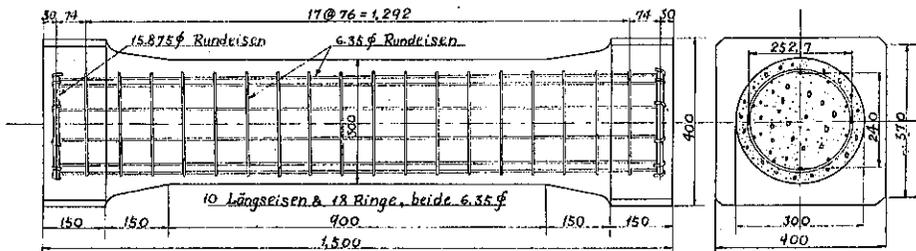


Abb. 9

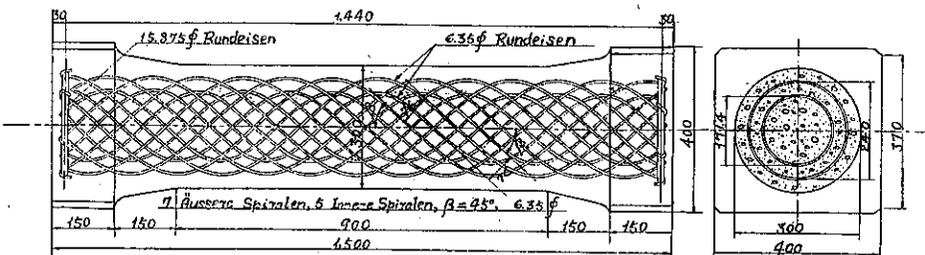


Abb. 10

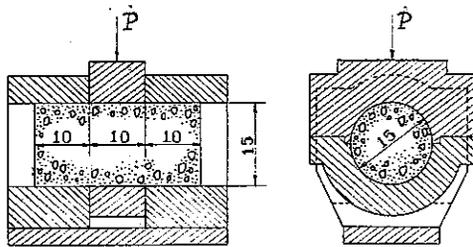


Abb. 11

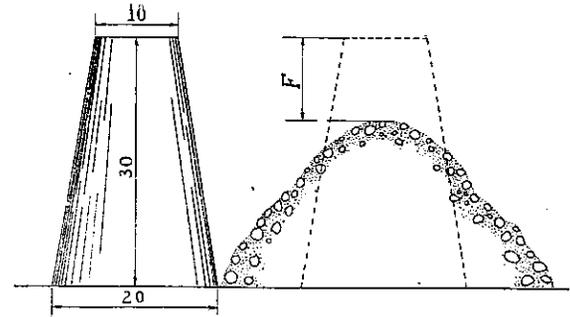


Abb. 33

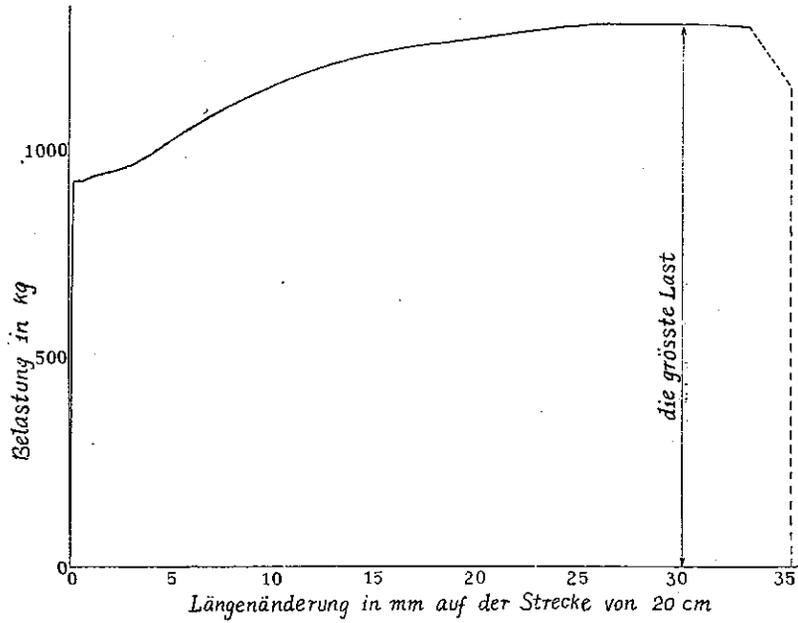


Abb. 12

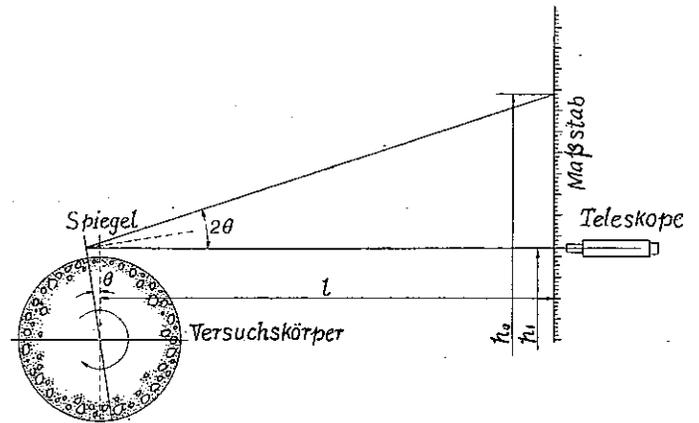


Abb. 36

(中大鉄金鋼鋼土の試験) 第 11 圖

(土木建築令附第十百條第一項第一號) 鐵附圖

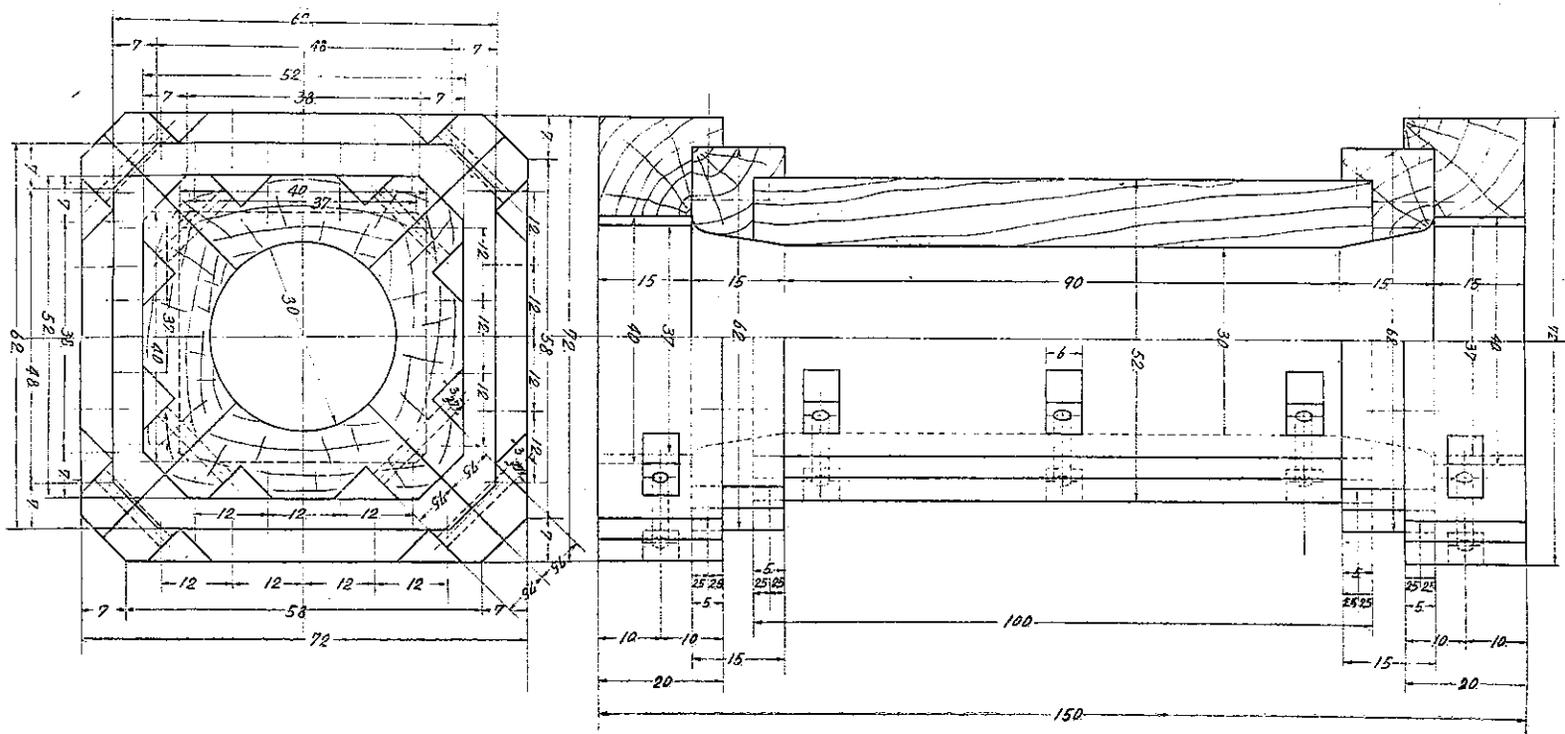


Abb. 13

40-5

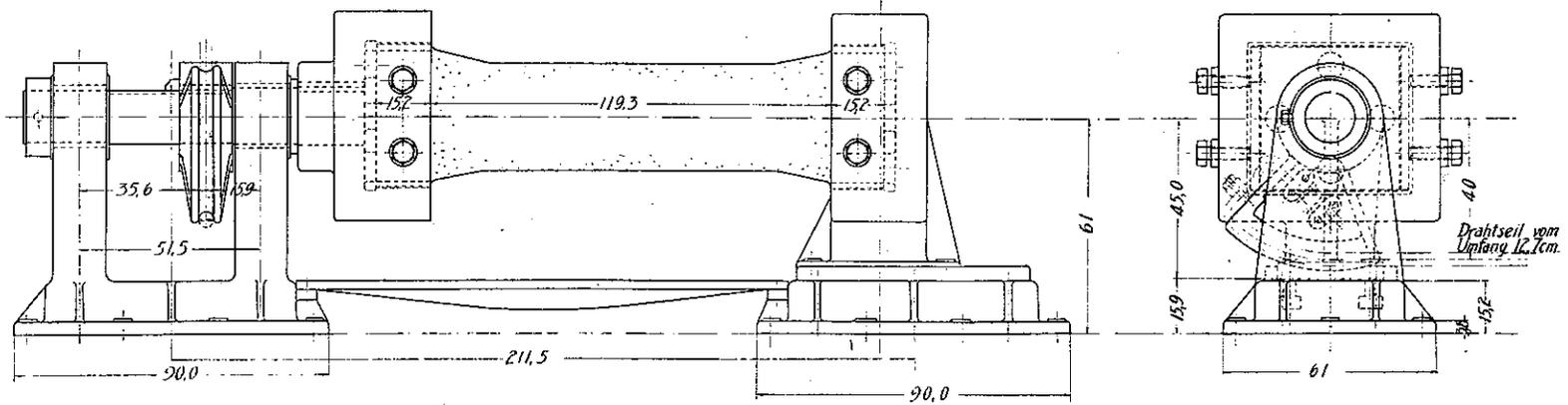


Abb. 37

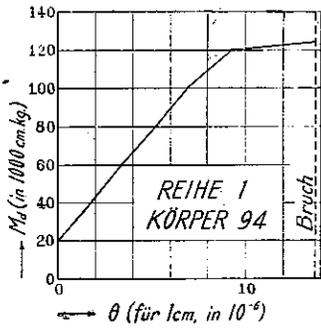


Abb. 57

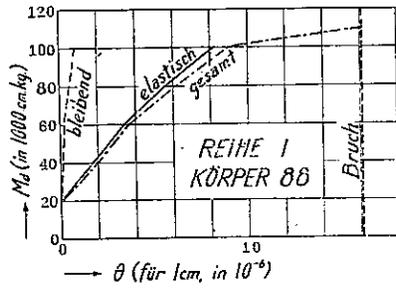


Abb. 58

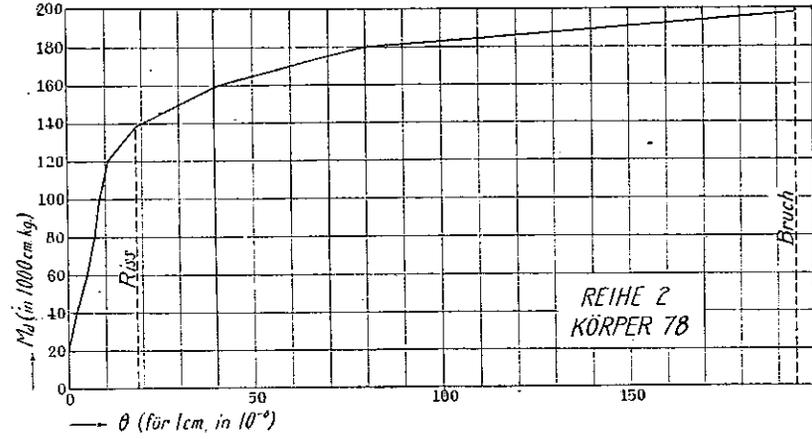


Abb. 59

中央電氣試験所「部材部」部在図

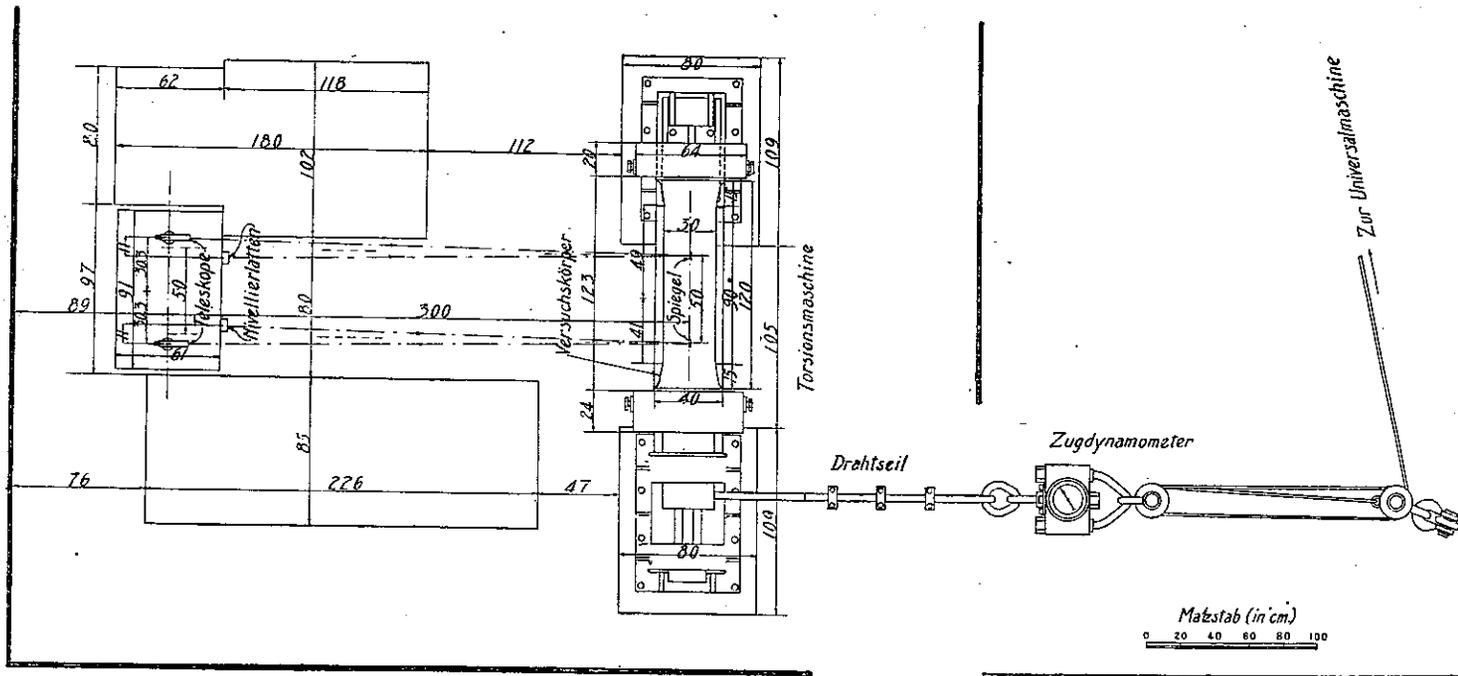


Abb. 38

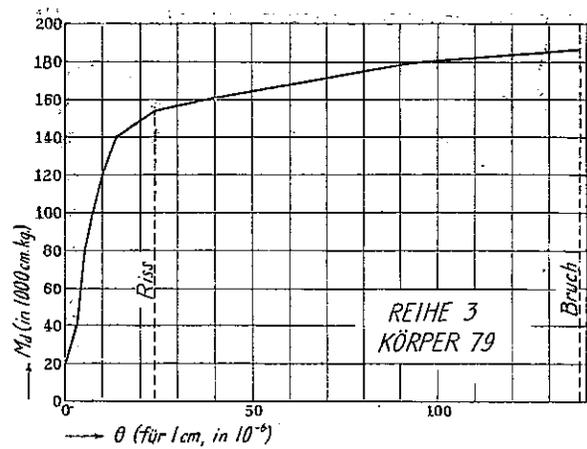


Abb. 60

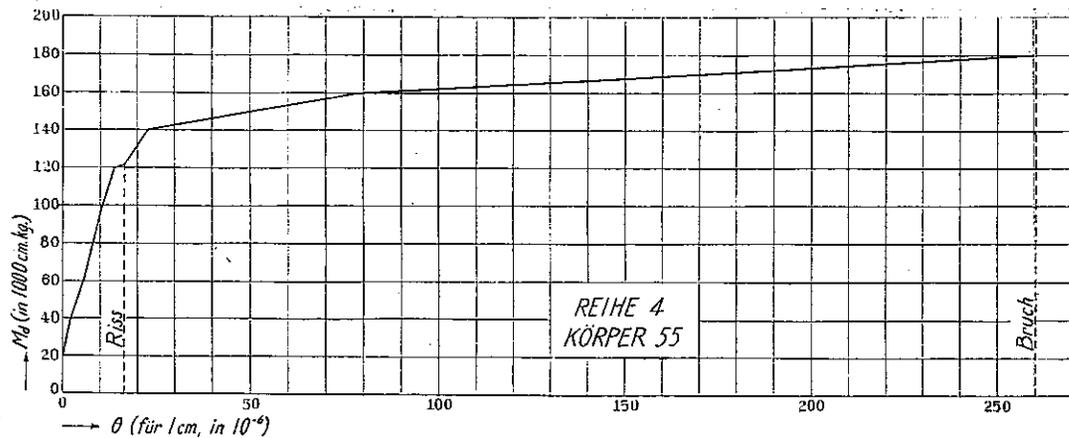


Abb. 61

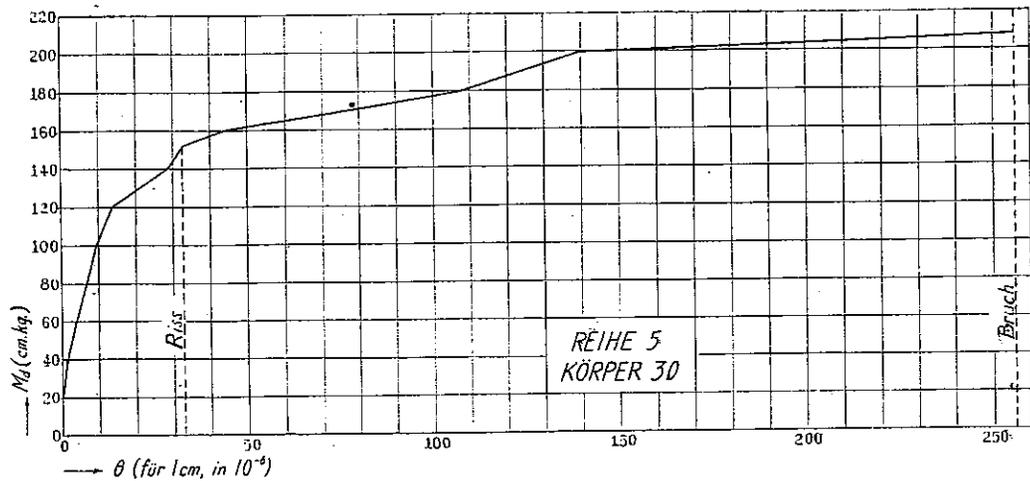


Abb. 62

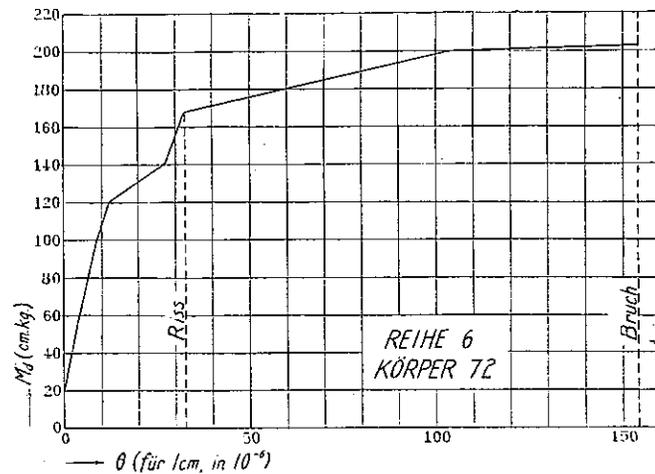


Abb. 63

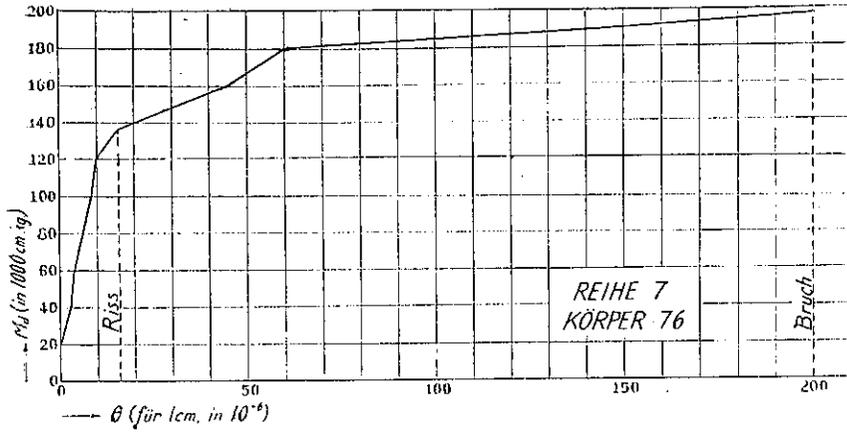


Abb. 64

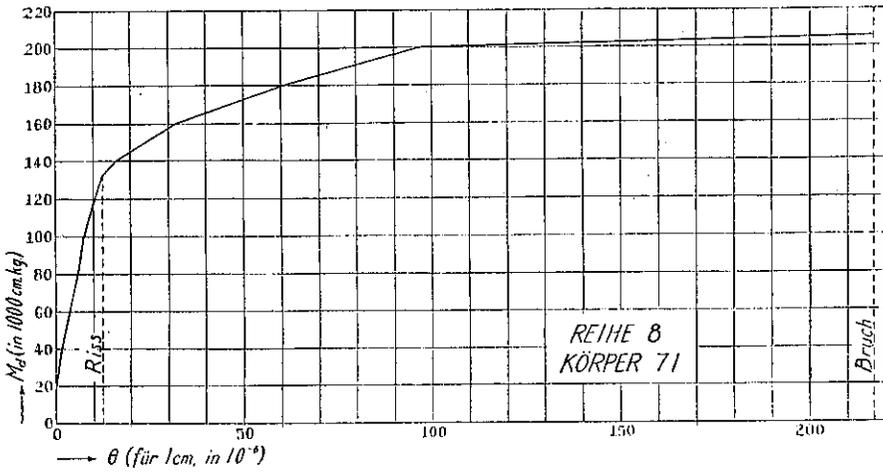


Abb. 65

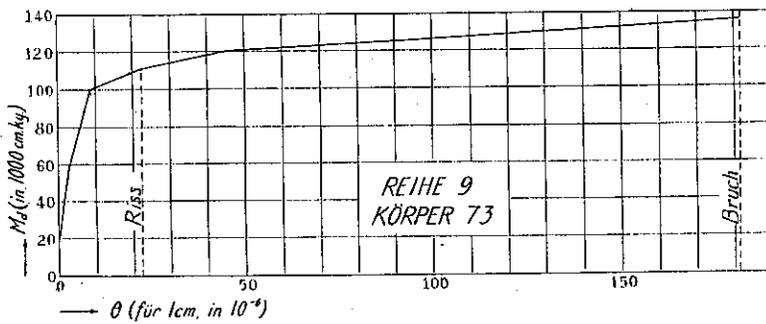


Abb. 66

(四) 鋼筋コンクリート構造設計

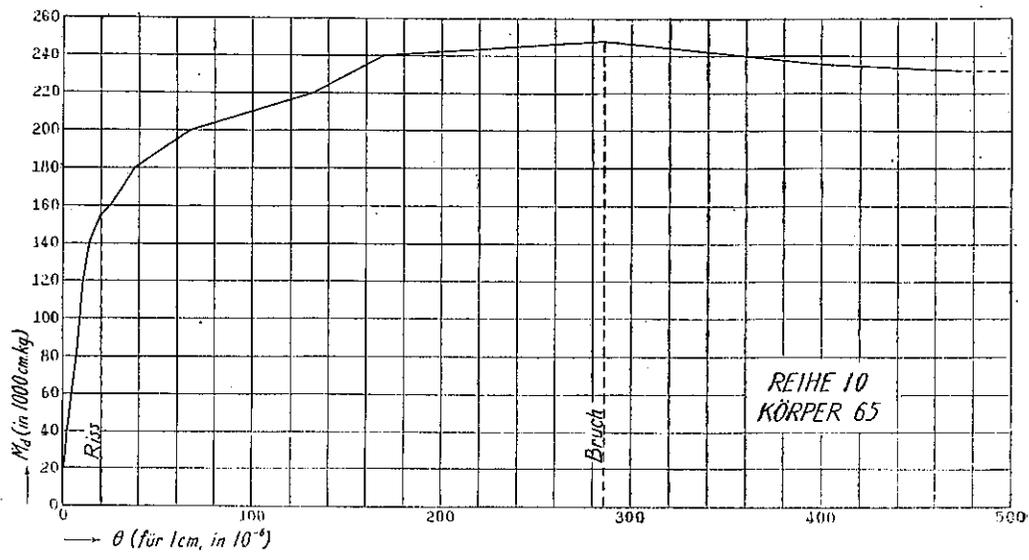


Abb. 67

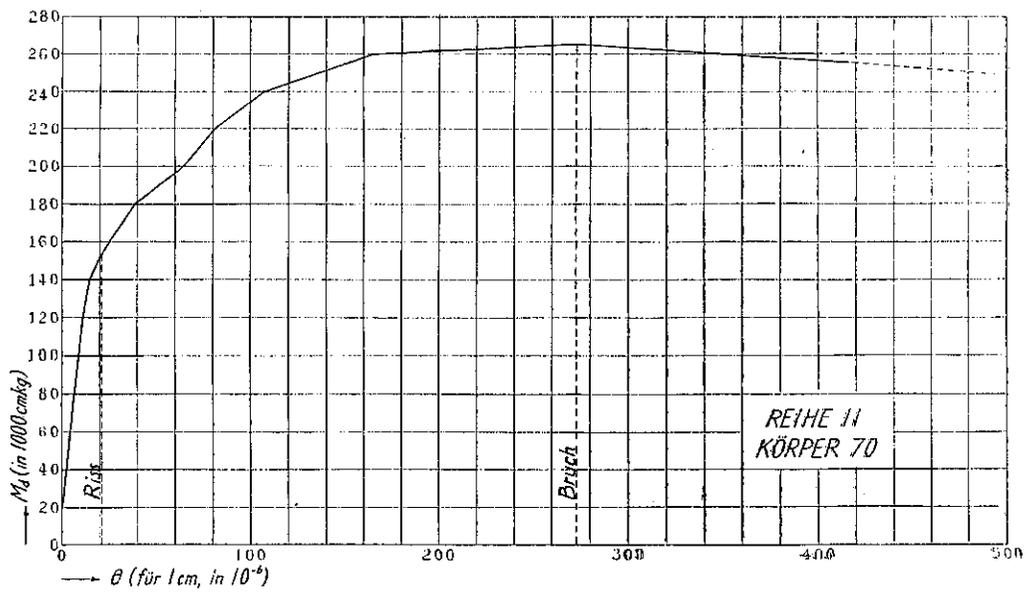


Abb. 68

(土木学会誌第三十三卷第一號附圖)

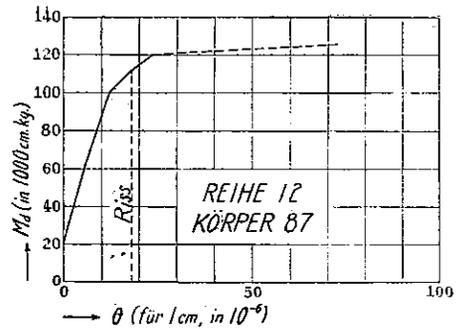


Abb. 69

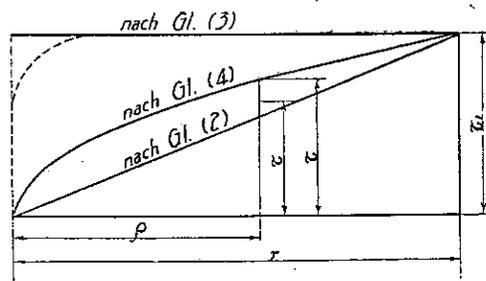


Abb. 70

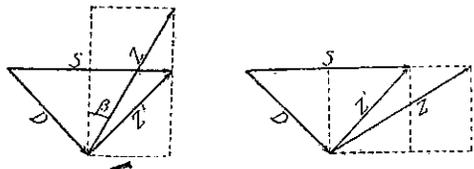


Abb. 71

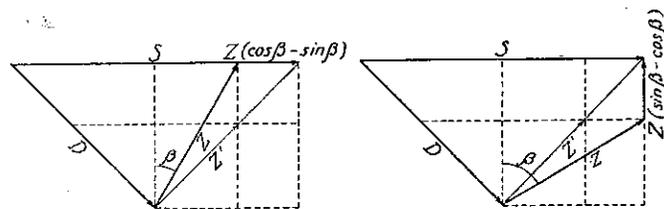


Abb. 72

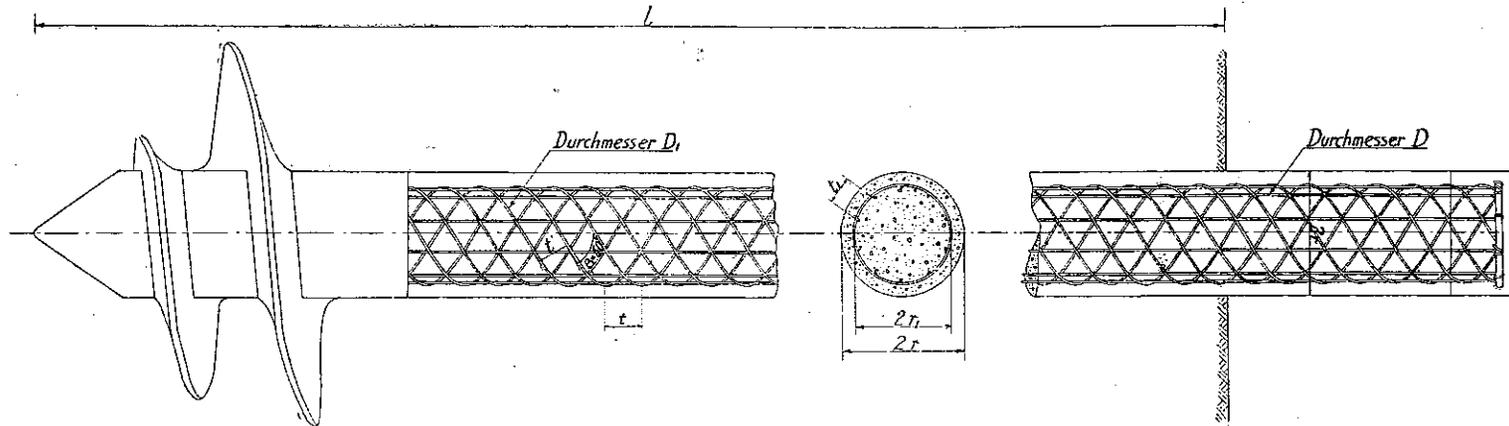


Abb. 73



Abb. 14

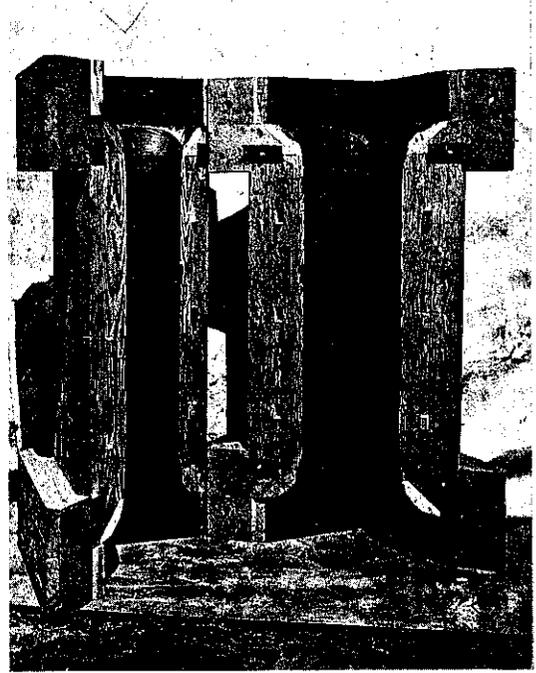


Abb. 15

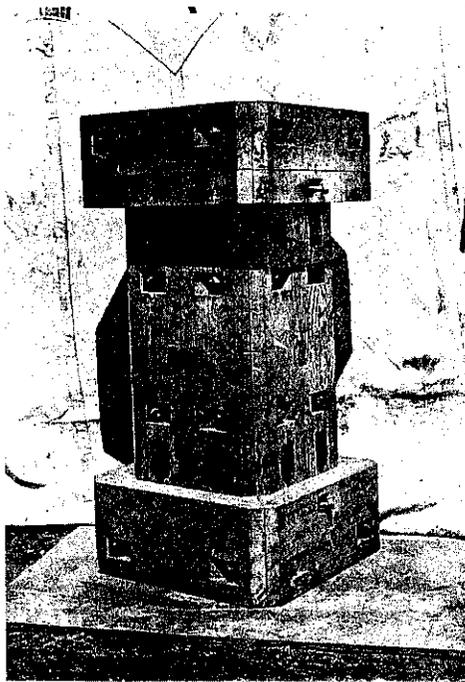


Abb. 16

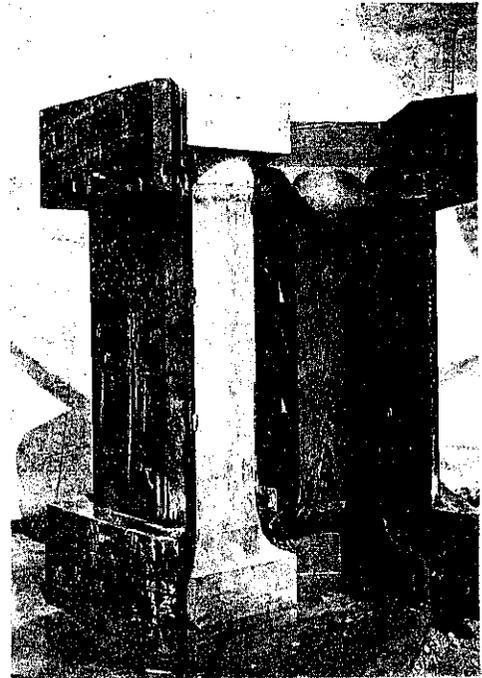


Abb. 17

(土木學會誌第十三卷第一號附圖)



Abb. 18

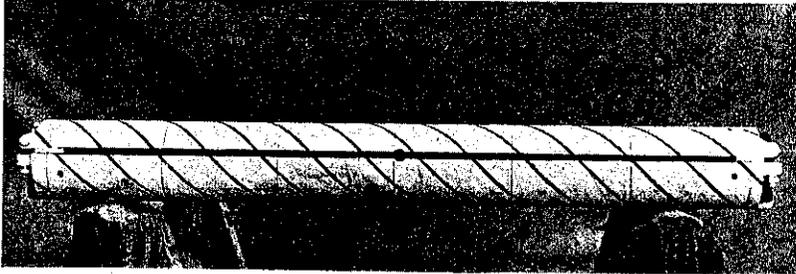


Abb. 19

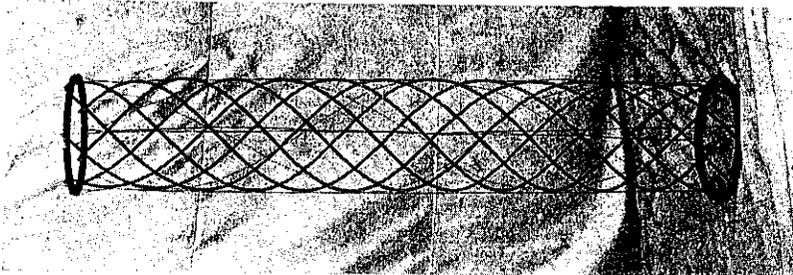


Abb. 20

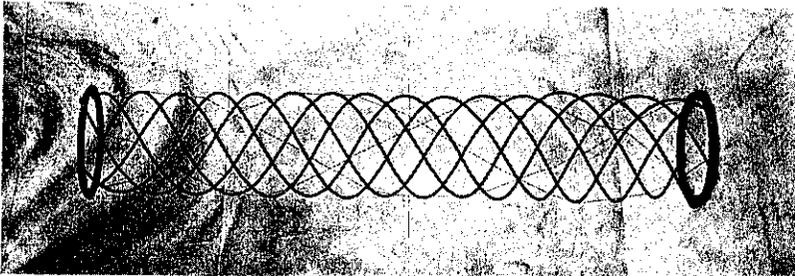


Abb. 21

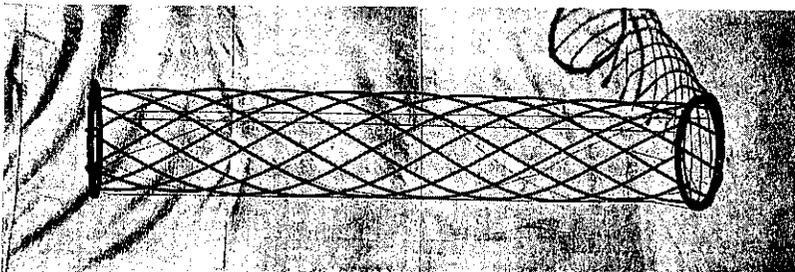


Abb. 22

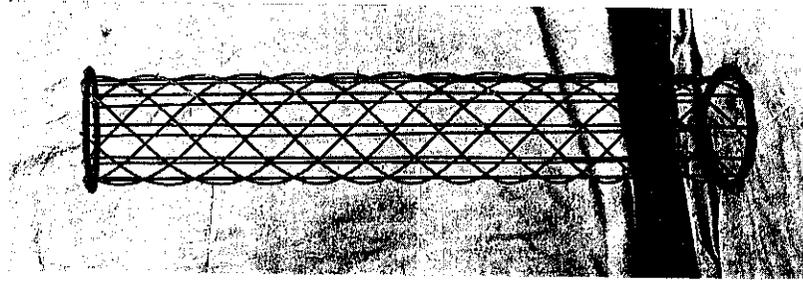


Abb. 23

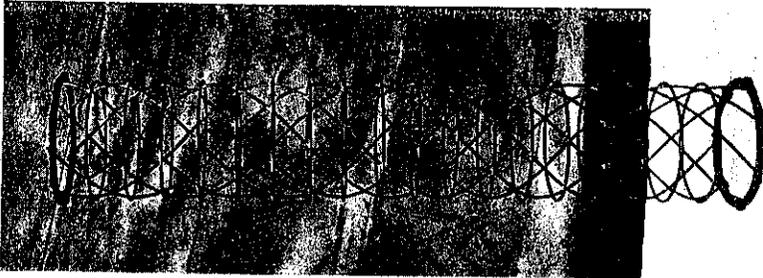


Abb. 24

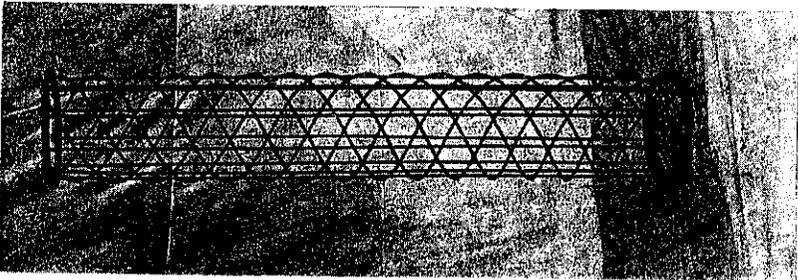


Abb. 25

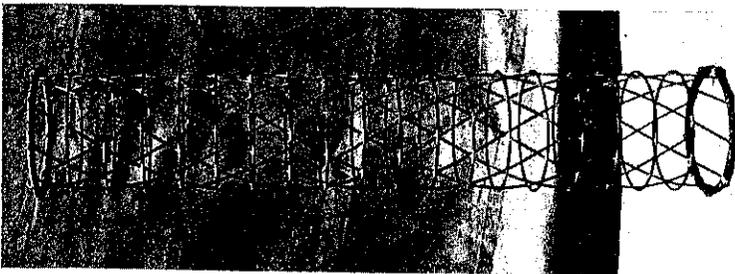


Abb. 26

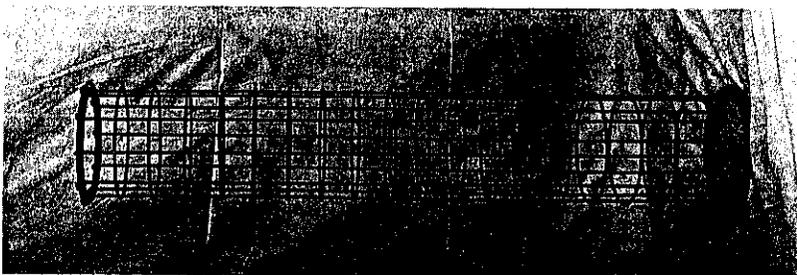


Abb. 27



Abb. 28

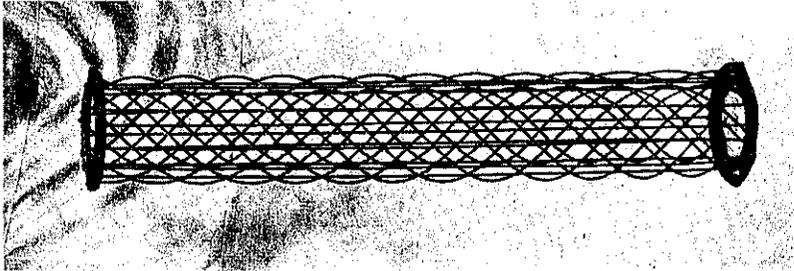


Abb. 29

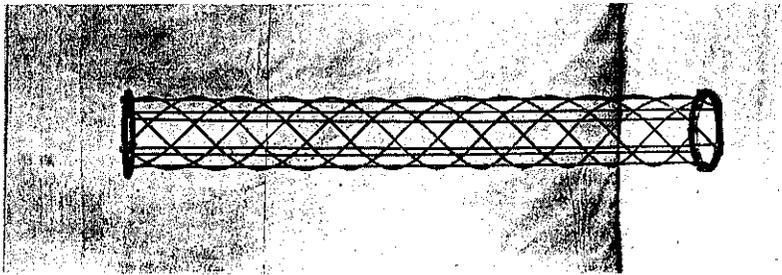


Abb. 30

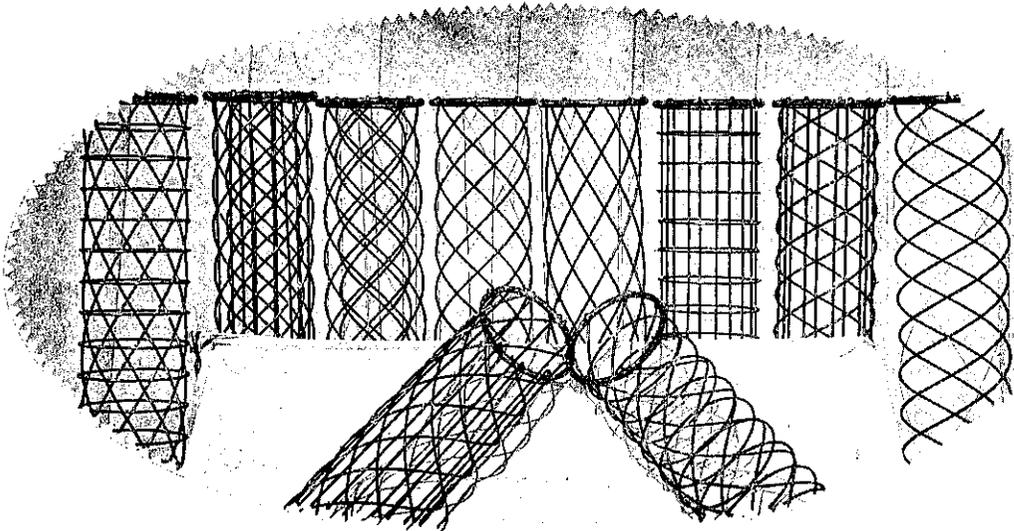


Abb. 31



Abb. 32

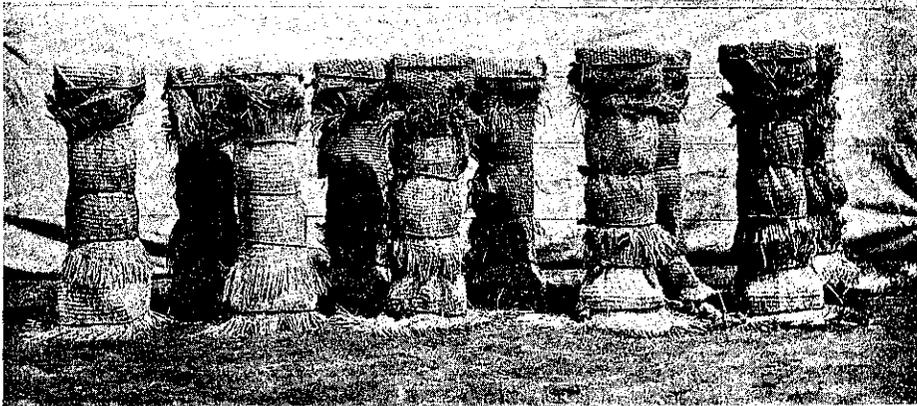


Abb. 34

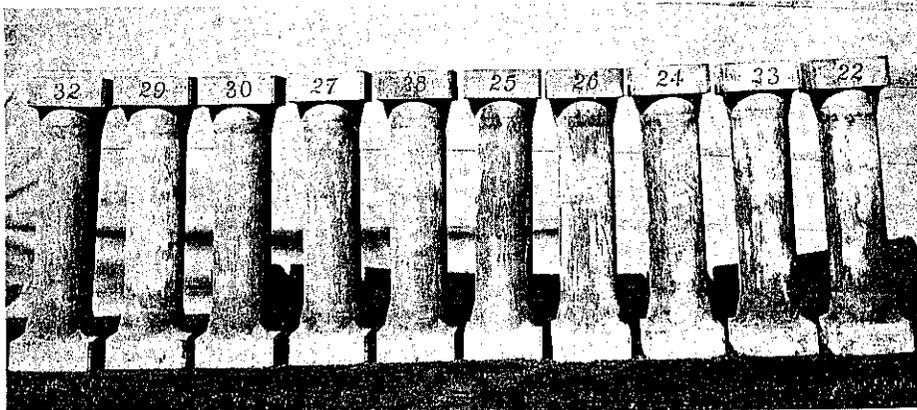


Abb. 35

(土木學會誌第十三卷第一號附圖)

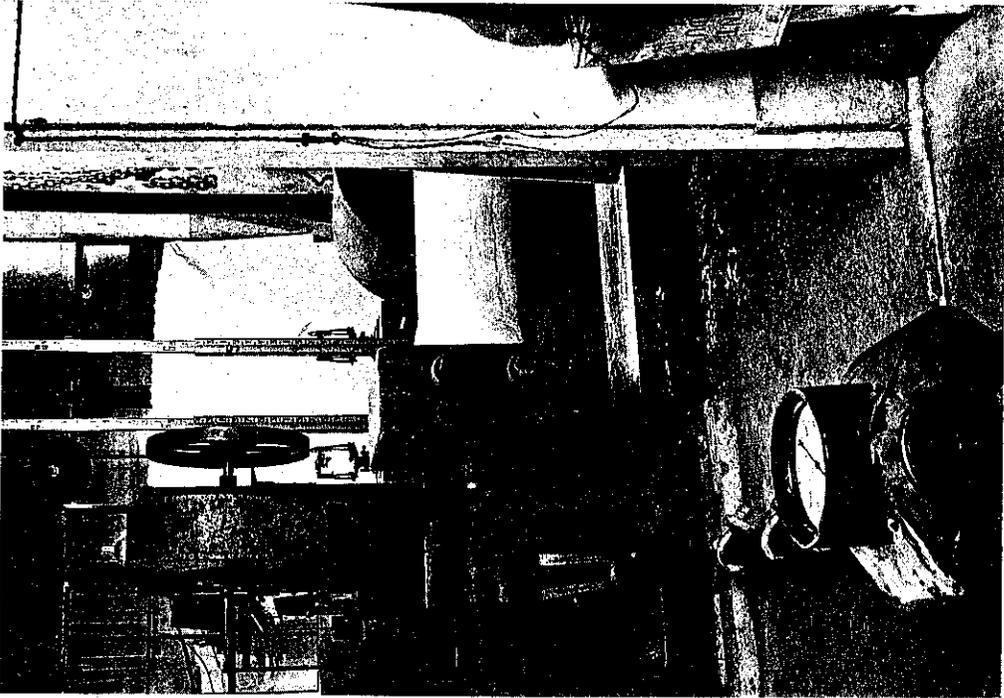


Abb. 39

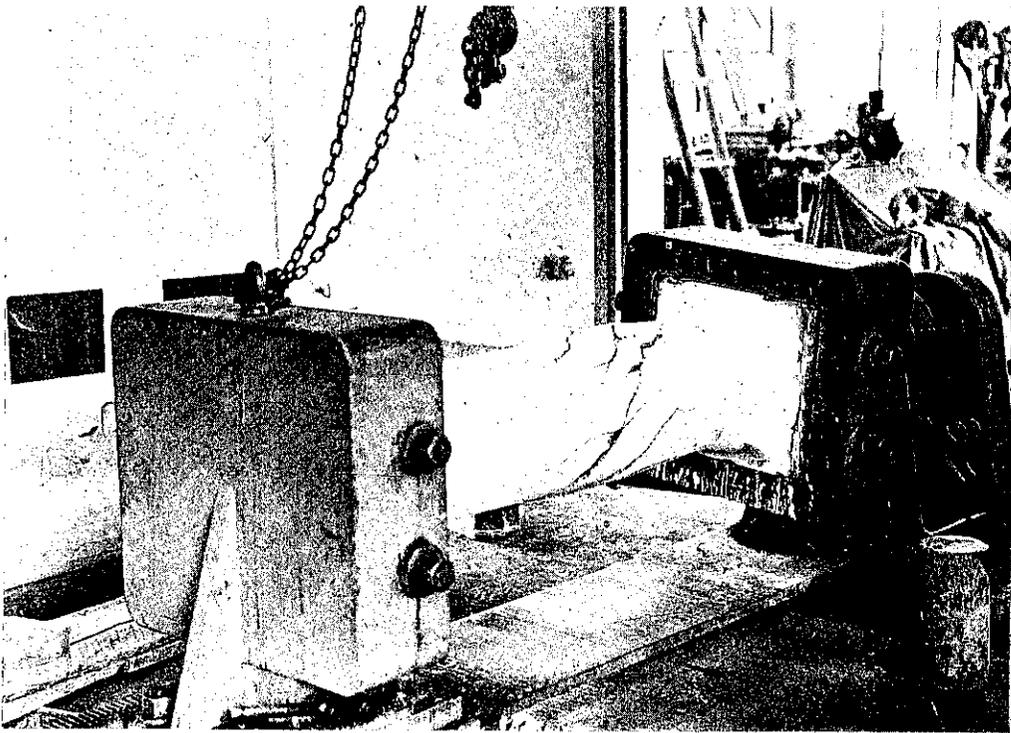


Abb. 40

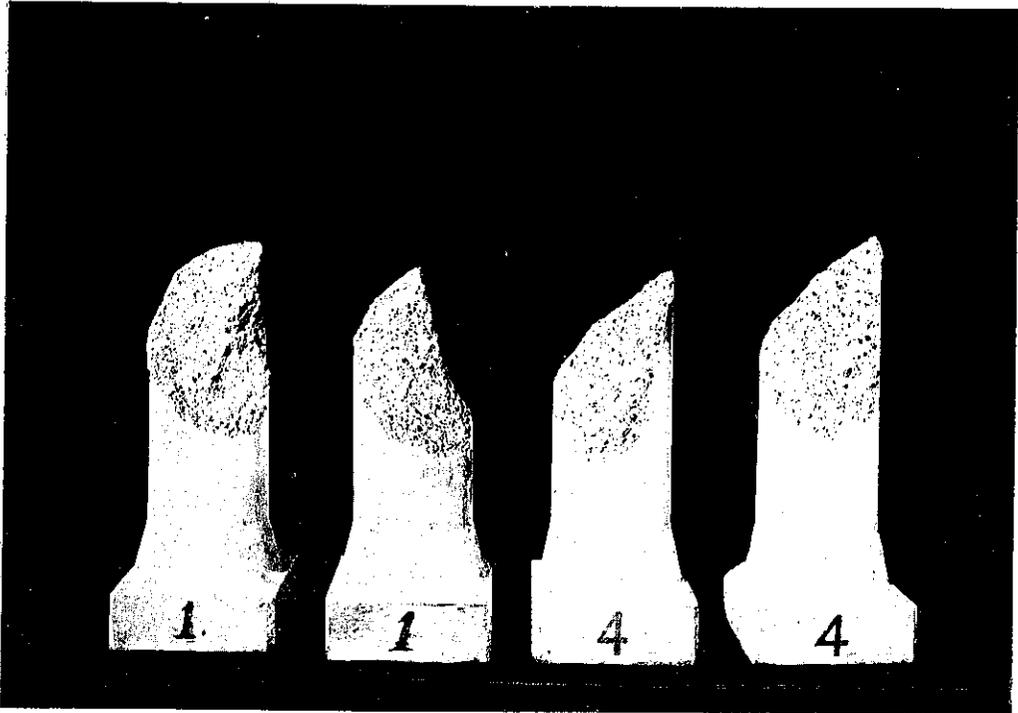


Abb. 41

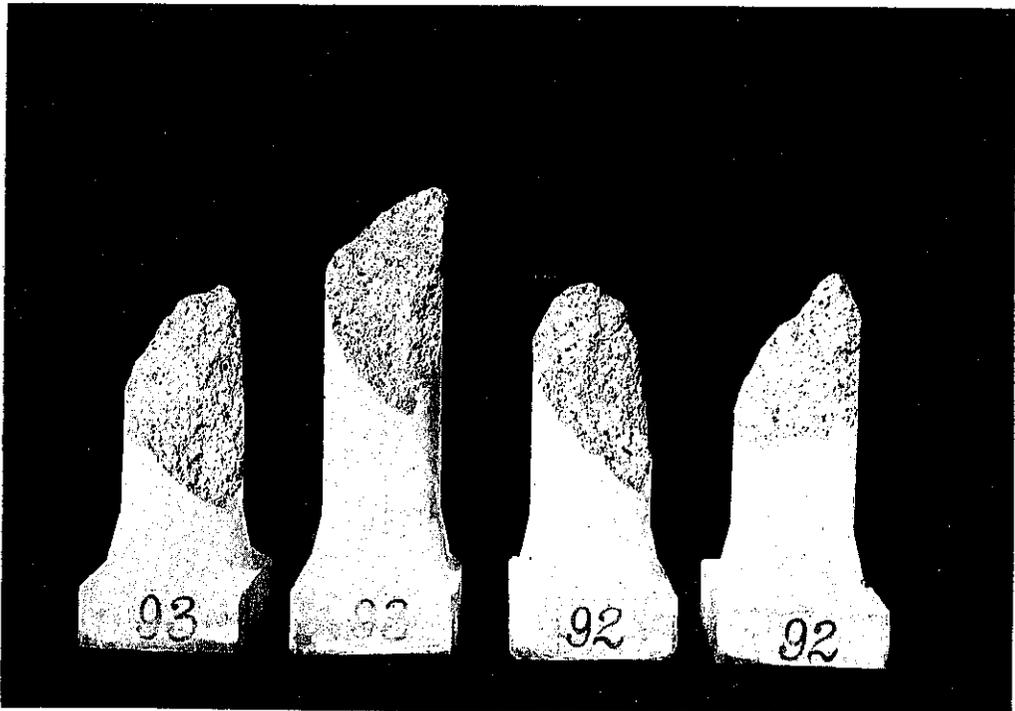


Abb. 42

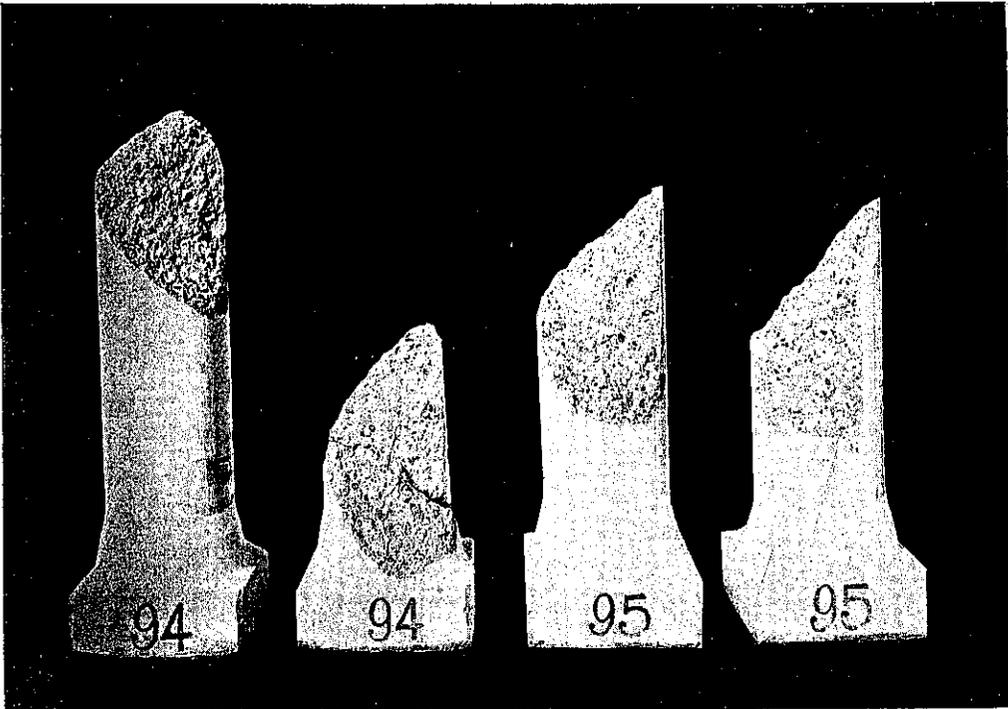


Abb. 43

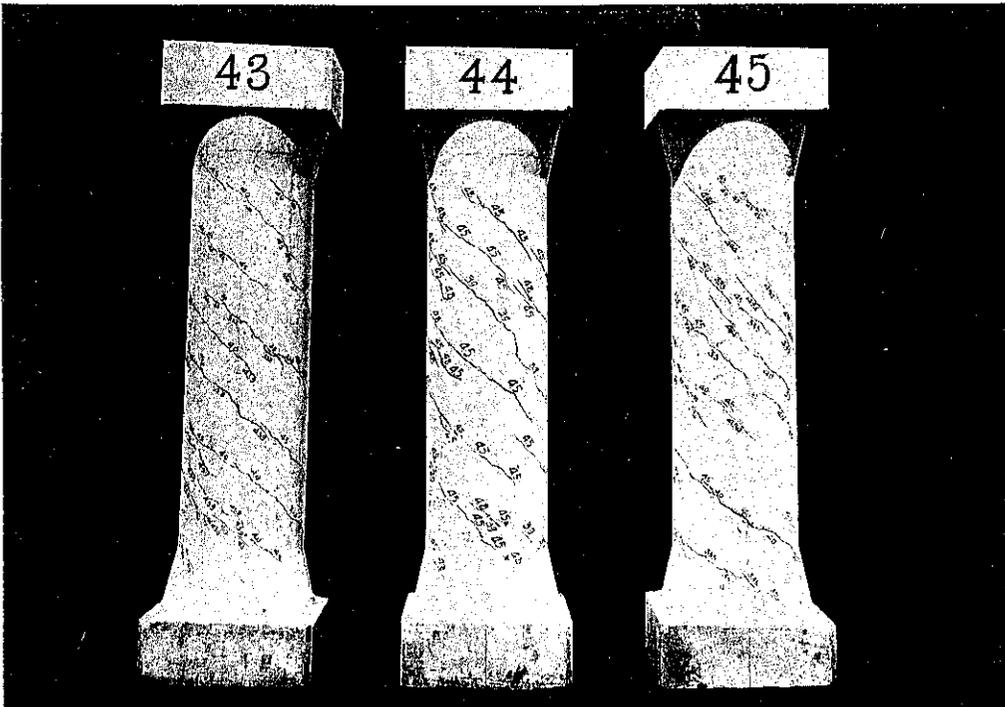


Abb. 44

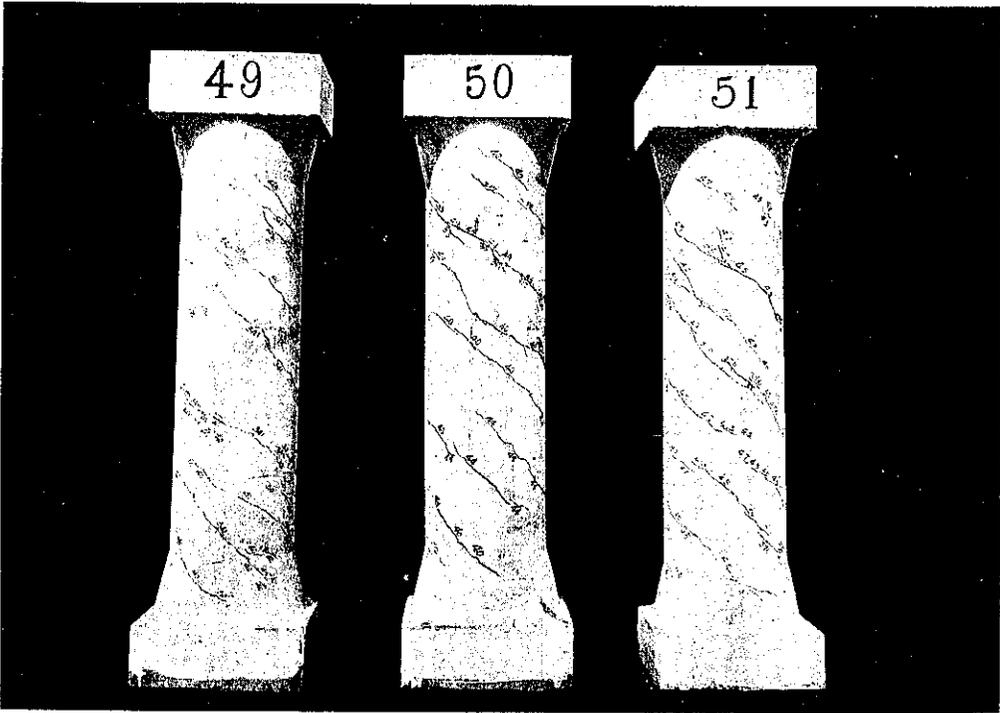


Abb. 45

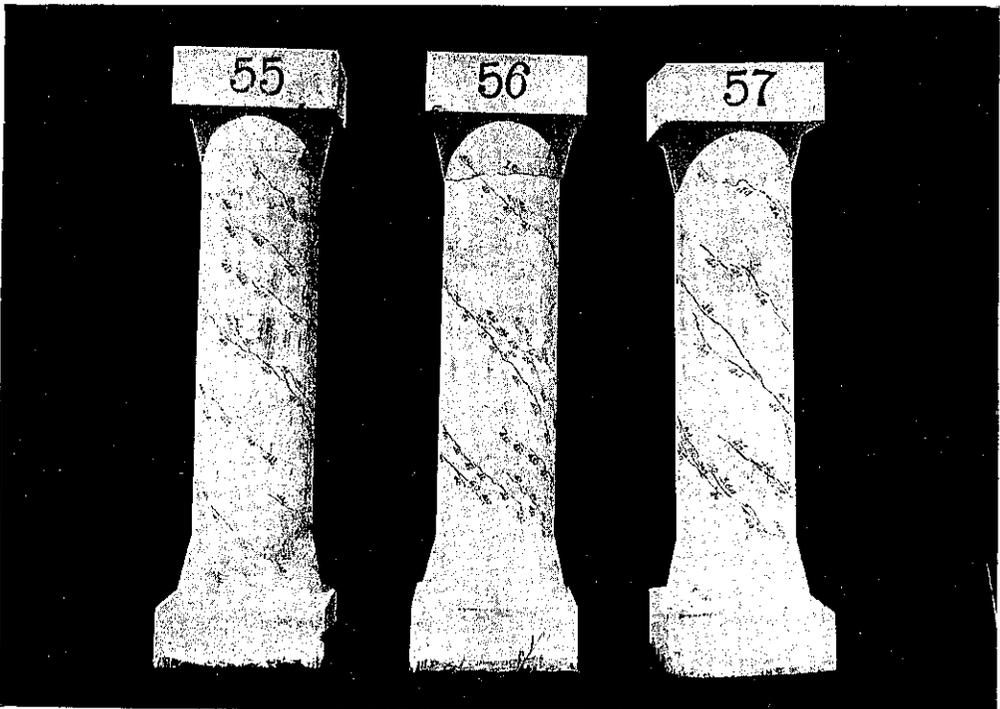


Abb. 46

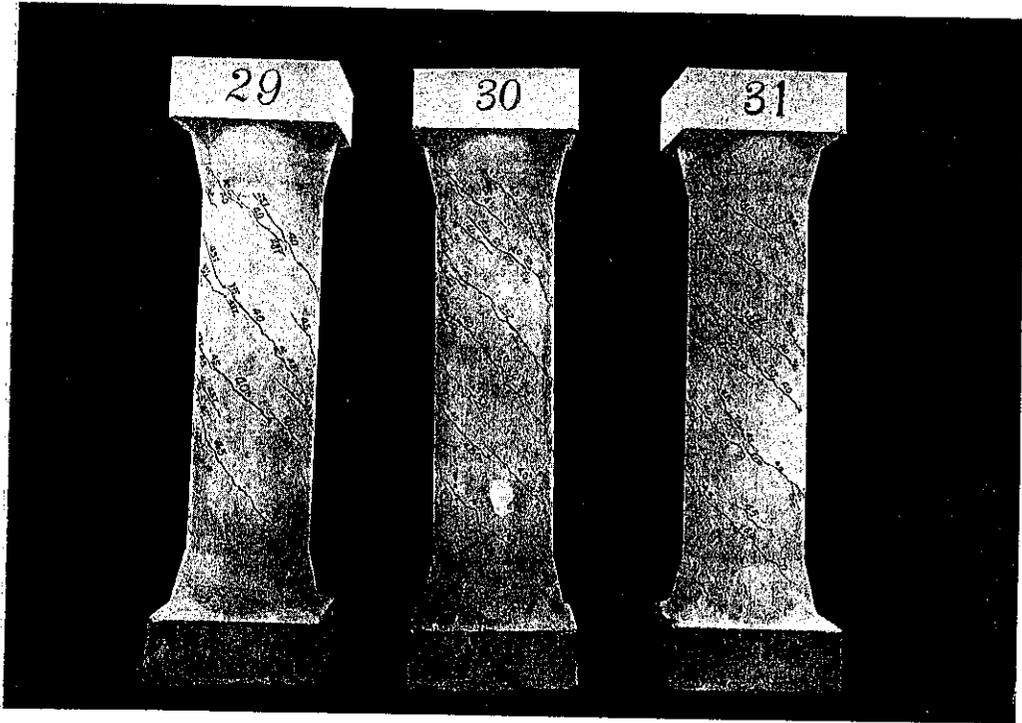


Abb. 47

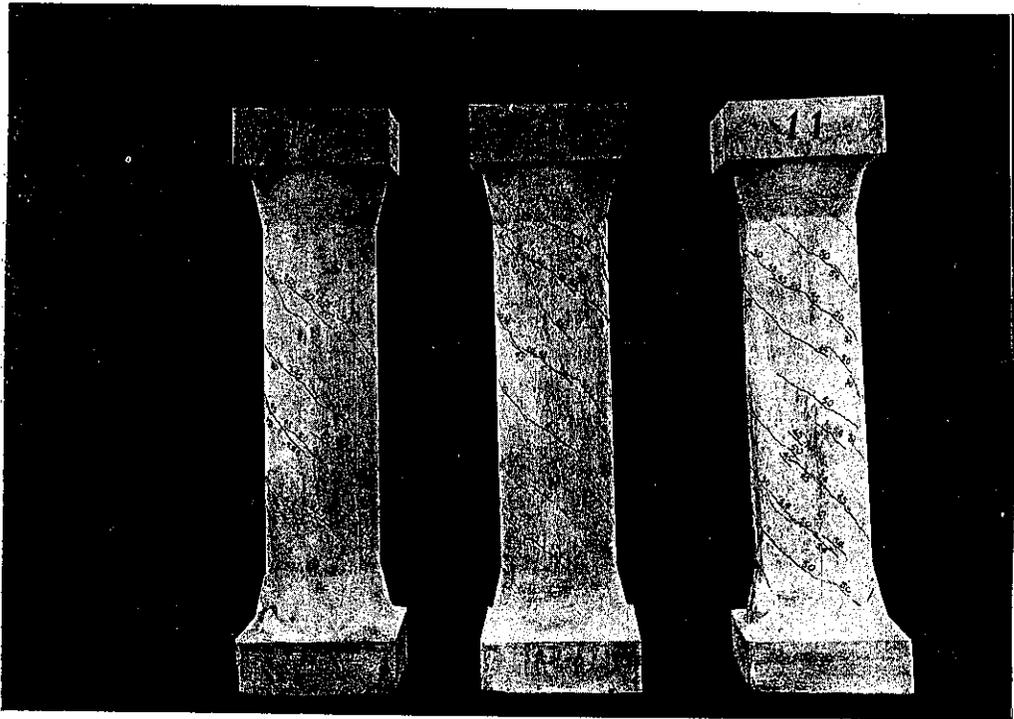


Abb. 48

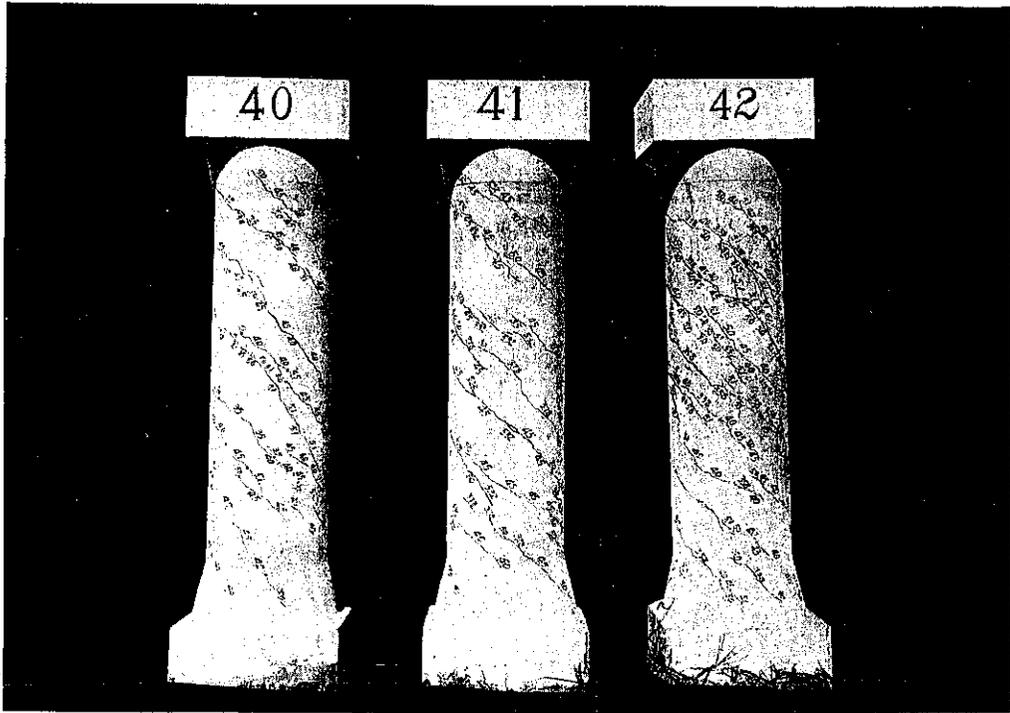


Abb. 49

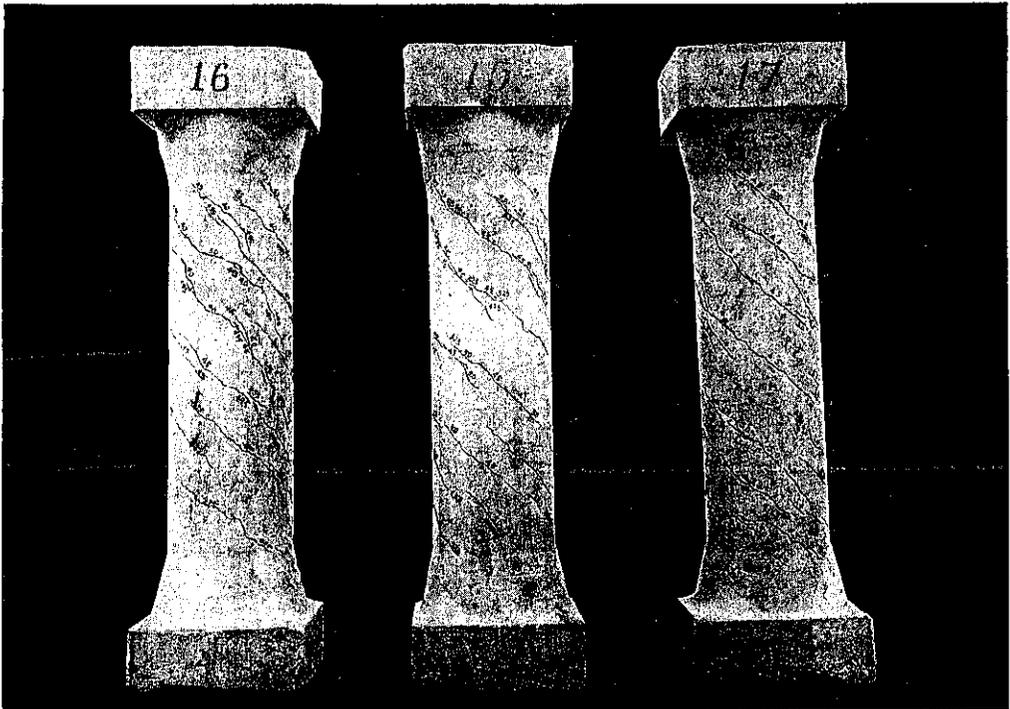


Abb. 50

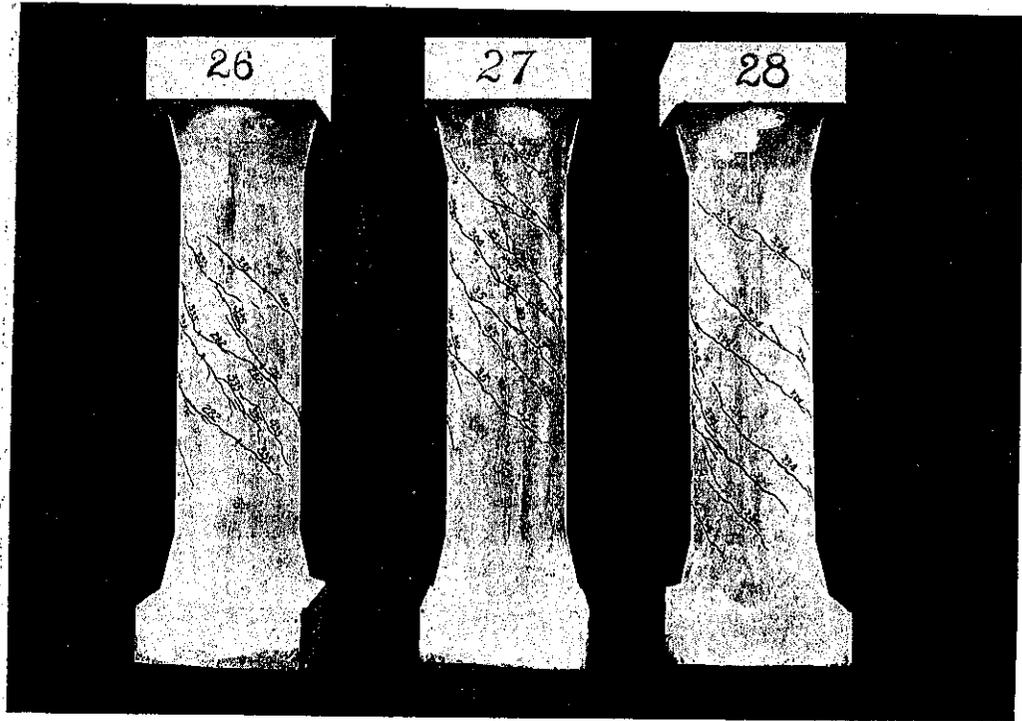


Abb. 51

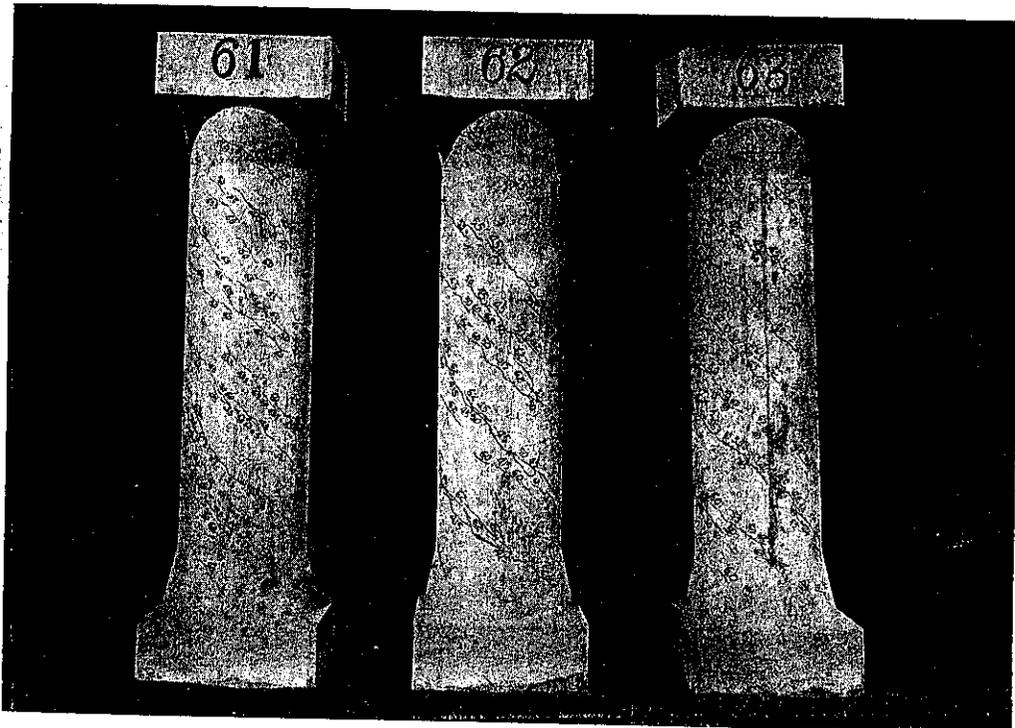


Abb. 52

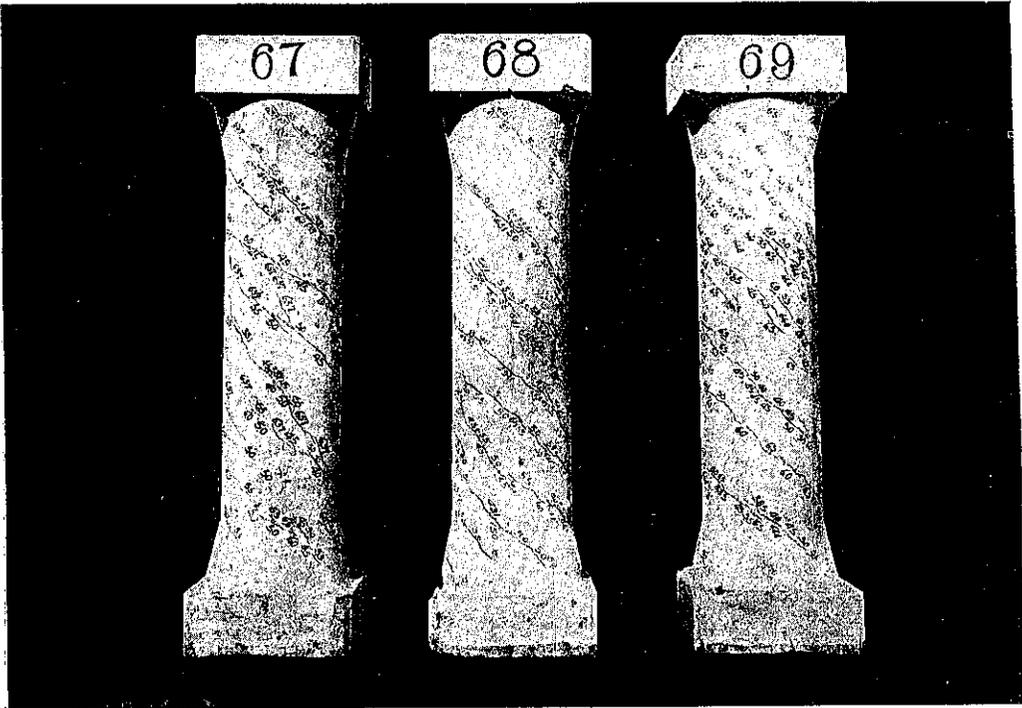


Abb. 53

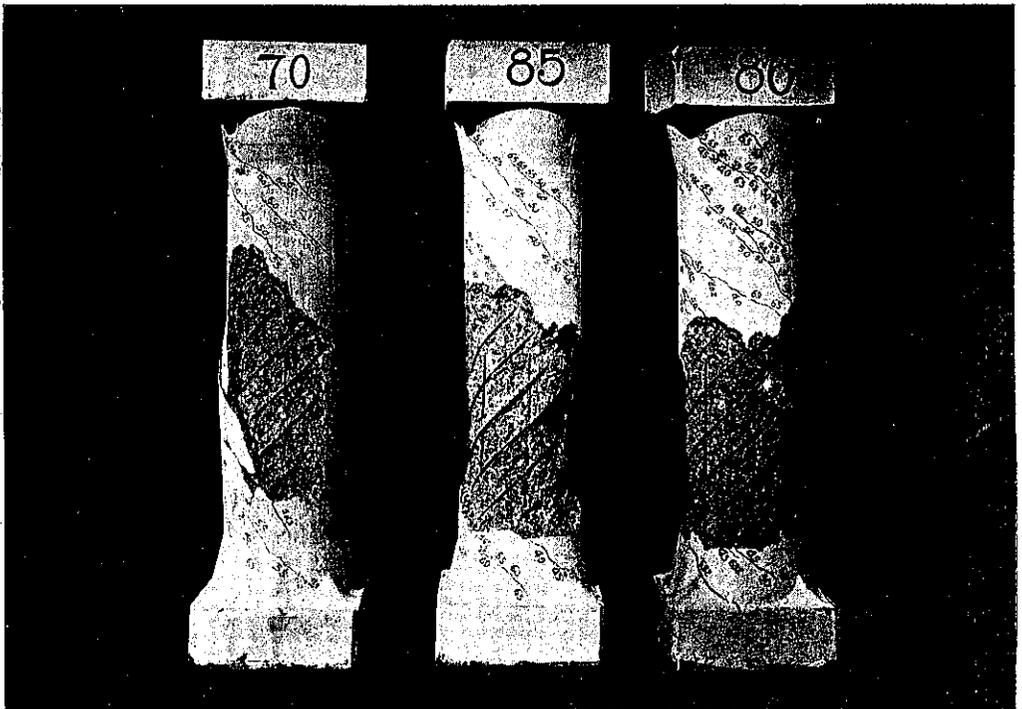


Abb. 54

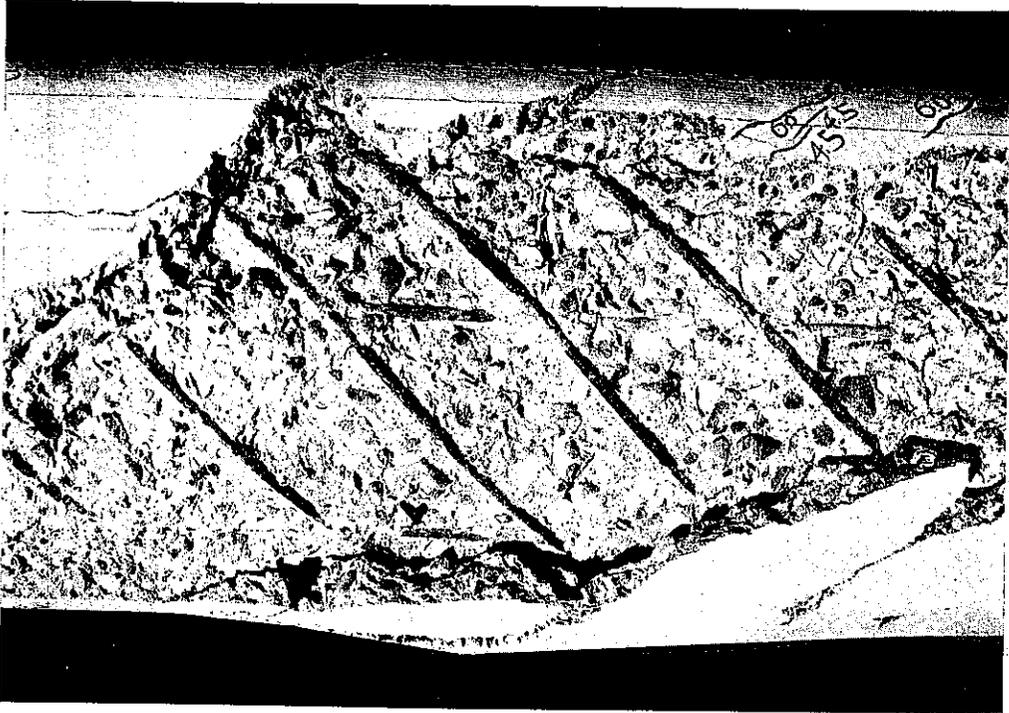


Abb. 55

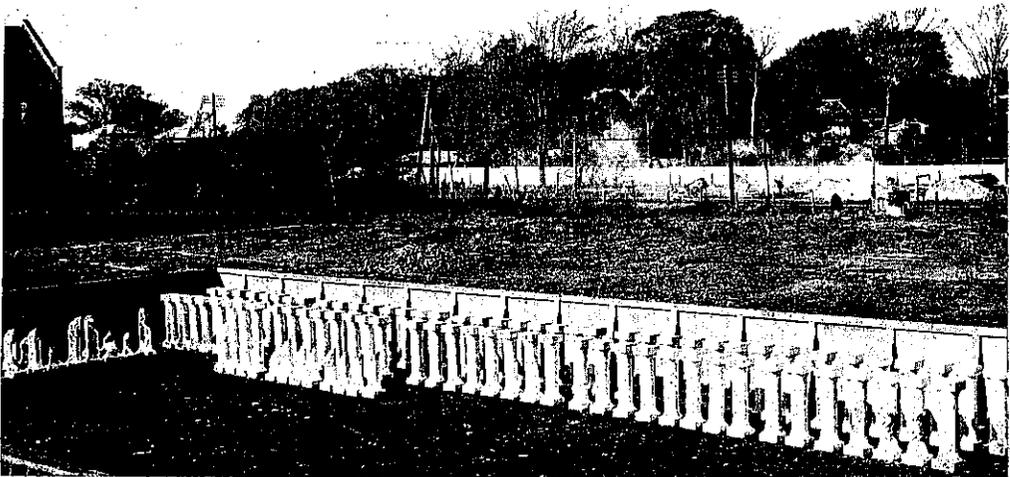


Abb. 56