



75 N3

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299743

Experimental-Untersuchungen

über

Zement-Eisen-Konstruktionen

von

Dr. H. Bausing

XXX
1100.

M. A. 1111/03.

Experimental-Untersuchungen

über die

Eigenschaften

der

Zement-Eisen-Konstruktionen

von

Armand Considère

Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Correspondant de l'Académie des Sciences de Paris.

Aus dem Französischen übersetzt und mit Erlaubnis des Autors herausgegeben

von

Ig. M. Blodnig

Assistent der Lehrkanzel für Brückenbau an der Technischen Hochschule in Wien.

F. Nr. 25033 



WIEN 1902.

Im Verlage von Lehmann & Wentzel (Paul Krebs)

I. Kärntnerstraße 30.

XXX
1100



|| 32293

Druck von R. Spies & Co. Wien.

Akc. Nr. 128/52

VORWORT.

Der vorliegenden deutschen Broschüre liegt die von Herrn A. Considère verfaßte Schrift „Étude expérimentale des propriétés du beton armé“ zugrunde.

Ich habe mich im ganzen so gewissenhaft als möglich an die Worte des Originals gehalten und daher auch häufig für Eiseneinlagen „Armaturen“ und für Betoneisenkonstruktionen „armierter Beton“ gebraucht.

Diese kleine Schrift bringt sehr wertvolle Aufschlüsse über das Verhalten der Betoneisenkonstruktionen unter den verschiedensten Umständen. Nachdem gegenwärtig die Frage dieser Bauart aktuell ist, so glaube ich, daß dieses Werk deutschen Fachkreisen nicht unwillkommen sein dürfte.

Zu besonderem Danke bin ich Herrn Hofrat J. E. Brik verpflichtet, der mich zur Übersetzung dieser interessanten Mitteilungen veranlasste und vom Autor derselben die Erlaubnis zu deren Veröffentlichung erwirkte.

WIEN, im Mai 1902.

J. Blodnig.

INHALT.

Einleitung	5
Volumsänderungen des Betons.	
<i>a</i>) an der Luft	6
<i>b</i>) im Wasser	8
Wirkungen der hygrometrische Änderungen	10
Biegungswiderstand der Betoneisenkonstruktionen	12
Einfluß des Zusammenziehens und Ausdehnens auf die Formänderungen und die Spannungen	17
Druckwiderstand des Betons	18
Widerstand gegen Abscheren und Gleiten	20
Wirkungen der Risse	24
Wirkungen der Convexität der Formänderungskurven der Mörtel und Betone	29
Berechnung der Dimensionen und Formänderungen	30



Experimentaluntersuchungen über die Eigenschaften des armierten Betons.

Im Jahre 1898, als diese Studien gemacht worden sind, bewiesen bereits zahlreiche und wichtige Bauten, daß der armierte Beton die größten Dienste leisten konnte und daß unternehmende und geschickte Männer glücklich angenommene Anordnungen verwirklicht hatten und hiedurch für die Berechnung der Dimensionen Regeln von genügender Garantie bezüglich der unmittelbaren Haltbarkeit gaben. Aber man beachtete nicht die Eigenschaften der neuen Materialien, über welche man völlig widersprechende Annahmen gemacht hatte. Man wußte nur, daß in den armierten Bauten der beanspruchte Beton größere Durchbiegungen aushält als diejenigen sind, welche sonst den Bruch des nicht armierten Betons herbeiführen, und daß man sehr oft nicht einmal Risse bemerkte.

Es war also gewiß, daß die Elastizitätsgrenze höher lag bei den Konstruktionen in armiertem Beton, man durfte auch bei ihnen das Prinzip der Proportionalität zwischen Anstrengung und Deformation, welches als Basis für die Widerstandsfähigkeit der Metalle dient, nicht mehr anwenden.

Es war wichtig, den Anfangszustand des Betons in den armierten Stücken zu studieren und das Gesetz zu suchen, welches die Beanspruchungen mit den Deformationen der Materialien, aus denen sie bestanden, in Verbindung bringt.

In Anbetracht der Schwierigkeit, welche sich ergibt bei Verteilung der jedem der beiden vereinigten Elemente zukommenden Widerstände, die man nur in der Gesamtheit messen kann, waren Unsicherheiten, sowie die Notwendigkeit, viele und verschiedene Versuche zu machen, voraussehen. Man war also genötigt, für die ersten Versuche

wenig kostspielige prismatische Körper von kleinen Dimensionen anzunehmen, um eine analytische Bestimmung möglich zu machen.

Andererseits war es wichtig, um die so verschiedenen Wirkungen der Biegemomente und Transversalkräfte auseinander zu halten, die Kräfte zu isolieren, und zu diesem Zwecke hat man die Belastungsweise wie in Fig. 1 angenommen.

Die Transversalkraft ist Null in BC und sehr groß in AB und CD .

Die verschiedenen untersuchten prismatischen Träger sind also gekennzeichnet durch zwei wichtige Punkte: die Kleinheit der Dimensionen und die Art der Belastung. Folglich sind die Gesetze, welche sich ergeben werden, nur für Stücke gültig, die den bezeichneten Bedingungen entsprechen, und ihre Allgemeinheit wird nur dann sicher sein, wenn sie mit allen bei den Bauten und bei den Versuchen mit großen Konstruktionen gemachten Beobachtungen übereinstimmen.

Alle in der Folge aufgestellten Behauptungen stehen unter diesem ausdrücklichen Vorbehalt.

Außer diesen analytischen Versuchen haben wir bei Bojenkonstruktionen Versuche über den Zusammenhang wiederausgebesserter Risse an armierten oder nicht armierten Stellen gemacht, wobei wir interessante Beobachtungen über Herstellungen in Zementmörtel anstellen konnten.

Volumsänderung des Betons.

Die über diesen Gegenstand an die Akademie der Wissenschaften gemachte Mitteilung beschränkte sich auf eine kurze Zusammenfassung des Wesens und auf den Hinweis einiger praktischer Folgerungen.

a) Zusammenziehen an der Luft.

Die Mörtel, welche langsam an der Luft erhärten und an der Luft bleiben, haben die Tendenz des Zusammenziehens, umsomehr, je fetter sie angemacht sind, u. zw. bewegt sich diese Volumsänderung zwischen 1.50 mm bis 2 mm per Meter für reinen Zement und zwischen 0.30 mm bis 0.50 mm für magere Betone.

Wenn man auf einem widerstandsfähigen Boden oder auf einer schon erhärteten Mauer eine neue Mauer aufführt, ist das Zusammenziehen dieser letzteren störend und es resultieren daraus Spannungen parallel zu den Fugen.

In prismatischen Körpern von 30 cm Seitenlänge aus reiner Zementmasse haben diese Spannungen zahlreiche

vertikale Risse erzeugt, welche aber erst nach Verlauf eines Jahres zum Vorschein kamen. Der Teil *M* wurde drei Tage vor *N* aufgeführt. (Fig. 2.)

Solche Risse hat man nicht beobachtet bei identischen Prismen, bestehend aus Mörtel von weniger als 800 *kg* Zement auf 1 *m*³ Sand.

In den Prismen aus reinem Zement, welche mit Eisenstäben durchkreuzt waren, die das Zusammenziehen im vertikalen Sinne verhinderten, haben sich Fugen in solcher Größe geöffnet, dass die Trennung mit freiem Auge sichtbar war. (Fig. 3.)

Wenn die inneren Biegungen, herrührend vom Zusammenziehen, auch keine Risse erzeugten, so veränderten sie nichtsdestoweniger ungünstig die Eigenschaften der Mörtel und Betone. Die Prüfung eines Türmchens aus reinem Zement von 5 *m* Durchmesser, welches durch das Meer zerschellt wurde, hat in dem über dem höchsten Wasserspiegel gelegenen Teil eine arge Beschädigung gezeigt, für deren Entstehung man keine andere Ursache gefunden hat, als die durch das Zusammenziehen erzeugten Biegungsspannungen.

Wenn nun das Zusammenziehen verhindert wird, u. zw. nicht durch äußere Einflüsse, sondern durch in die Masse eingelegte Eisenstäbe, so werden die inneren Biegungsspannungen, welche sich im Beton erzeugen, durch die Aktion des Metalles ausgeglichen und es zeigten sich auch niemals unmittelbare, Risse in den Prismen von irgend welchen von uns angewendeten Mischungsverhältnissen. Als aber Prismen aus reinem, armiertem Zement an die trockene Luft gebracht und Biegungsbeanspruchungen ausgesetzt worden sind, haben sich Risse gezeigt, u. zw. bei Verlängerungen von 0·10 bis 0·25 *mm* pro Meter, während analoge Prismen in Mörtel oder magerem Beton (300 bis 600 *kg* Zement auf 1 *m*³ Sand und Kis) ohne zu reißen Verlängerungen von 0·80 *mm* bis 2 *mm* pro Meter ertrugen.

Diese Tatsache verdient umsomehr Aufmerksamkeit, als der reine Zement ohne Armatur viel größere Längenveränderungen zuläßt wie die mageren Mörtel. Die geringere Leistungsfähigkeit des reinen Zementes in den der Luft ausgesetzten armierten Versuchsstücken scheint als Ursache die Tendenz des vier- oder fünfmal stärkeren Zusammenziehens zu haben. Durch die Armaturen verhindert man nun zum großen Teil die Fähigkeit der Längenänderung, welche der Zement besitzt, resp. man hebt sie vollkommen auf.

Da diese der Verminderung des Volumens entgegengesetzten Hindernisse ein Rissigwerden ausschließen, und das ist bei den mageren Betonen der Fall, veranlassen sie eine Verminderung der Elastizität, des Widerstandes und der Fähigkeit der Längenänderungen vor dem Bruch, welche um so größer ist, je mehr Widerstand die Armaturen dem Zusammenziehen entgegensetzen.

Diese ungünstigen Veränderungen vergrößern sich mit der Zeit während mehrerer Monate.

Die praktischen Folgen dieser Tatsachen scheinen die folgenden zu sein:

Der Gebrauch der reicheren Mischungsverhältnisse bietet Gefahren für das der trockenen Luft ausgesetzte Mauerwerk, ob armiert oder nicht.

Jedes der Volumänderung entgegengesetzte Hindernis vermindert die guten Eigenschaften der Mörtel und Betone in einem Maße, das um so größer wird, je fetter die Mischung ist und je mehr ein Zusammenziehen verhindert wird.

Die Nachteile, welche daraus resultieren, haben relativ weniger Wichtigkeit für magere Betone; sie sind aber sehr schwer für die der trockenen Luft ausgesetzten fetten Mörtel.

Es ist daher günstig, die Mauern so lange und so viel als möglich feucht zu halten.

b) Ausdehnung im Wasser.

Die Mörtel, welche unter Wasser gebracht, allmählich erhärten, zeigen das Bestreben, sich nach allen Richtungen ihres Volumens auszudehnen, und zwar um so mehr, je fetter die Mischung ist. Die Ausdehnungen variieren von 1 mm bis 2 mm pro Meter für reinen Zement und von 0.20 mm bis 0.50 mm für magere Betone.

Wenn die Ausdehnung nicht frei vor sich gehen kann, entwickeln sich im Mauerwerk Spannungen, welche viel höhere Werte annehmen können, als die Spannungen, welche sich beim Zusammenziehen an der Luft ergeben haben. Man setzte die Versuche fort, die darauf gerichtet waren, das Gesetz aufzustellen, nach welchem die Deformationen, über die hinauszugehen die Mörtel durch irgend welche Fesseln verhindert werden, mit den Spannungen, die sich dabei entwickeln, zusammenhängen. Man kann sich eine Vorstellung von der Wichtigkeit dieser Spannungen machen durch die Tatsache, daß in einem Prisma mit rechteckigem Querschnitt von 60×25 mm Fläche aus reiner Zementmasse, welches in seiner Achse durch ein Rundeisen von 10.20 mm Durchmesser armiert ist, nach sechsmonatlichem Verweilen unter

Wasser sich gegenseitige innere Spannungen von 1.0 kg entwickelt haben, d. i. gleichbedeutend einem Druck von 60 kg/cm^2 im Zement und einer Zugspannung von 12 kg/mm^2 im Eisen.

Die Spannung des Eisens ist direkt gemessen und so genau als möglich gerechnet worden; indem man nämlich den Elastizitätskoeffizienten mit der Verkürzung multiplizierte, welche in der Längsrichtung der Armatur in dem Momente erzeugt wurde, wo man den Zement, der die Armatur umgab und sie hinderte, ihre wirkliche Länge einzunehmen, vorsichtig zerbrochen hat.

Die inneren Spannungen, welche durch die der Ausdehnung der Mörtel und Betone entgegengestellten Hindernisse hervorgebracht werden, sind im allgemeinen ihrer Widerstandskraft günstig, weil sie die Druckkräfte vermehren und die Zugspannungen gerade in dem Material vermindern, welches zehnmal besser jene als diese aushalten kann. Sie haben besondere Wirkung für die Ausbesserung von Fugen und bei allen Querschnitten von minderem Zugwiderstand, deren Rissigwerden sie verhindern.

Daraus resultieren offenbare Vorteile hinsichtlich des Widerstandes von Mauerwerkskörpern, die von Wasser durchdrungen sind, und hinsichtlich der Erhaltung der Mörtel und Armaturen.

Man muß jedesmal Verschiedenheiten der Ausdehnungen in den Schichten ungleichen Alters befürchten und diese entwickeln dort Parallelspannungen in den Fugen, die dem Zusammenhang nachteilig zu sein scheinen. Aber im Gegensatz zu dem, was im Falle des Schwindens stattfindet, ist es das älteste Mauerwerk, welches hier die Spannungen erleidet, und sein Widerstand, höher als derjenige des darauf liegenden Mauerwerkes, vermindert die Gefahren, welche daraus resultieren können, doch haben wir keinen experimentellen Beweis dafür.

Im allgemeinen indessen soll man die Übertreibung der inneren Spannungen vermeiden, in welchem Sinne sie auch seien, denn ihre Wirkungen setzen sich nach wenig bekannten Gesetzen mit den Spannungen der äußeren Kräfte zusammen und man weiß nicht, wo sie hinzuzufügen sind.

Es scheint folglich im Interesse der Sache zu sein, die Menge des beigemischten Zementes nicht die Grenzen überschreiten zu lassen, welche den eingetauchten Mörteln eine genügende Wasserundurchdringlichkeit und eine lange Dauer sichern, und es scheint günstig zu sein, die Menge von $800\text{--}900 \text{ kg}$, welche das Maximum des Widerstandes gibt,

nur überschreiten zu lassen bei den Wellen ausgesetzten Arbeiten, wo die Raschheit des Bindens eine notwendige Bedingung für den Erfolg ist.

Aus der Zusammenfassung dieser Überlegungen folgt, daß die armierten Mauerwerkskörper jedenfalls bessere Resultate für die Wasserbauten liefern, als für die der Luft ausgesetzten Bauten und es ist für erstere ihr Erfolg durch Versuche ganz außer Zweifel. Dieser Schluß hat eine besondere Wichtigkeit für jene Organe, welche sich hauptsächlich mit öffentlichen Arbeiten und insbesondere mit Wasserbauten beschäftigen.

Es ist wichtig zu bemerken, dass in den Rechnungen über die Widerstände der Mauerwerke, die irgendwie eingeklemmt sind und ihr Volumen nicht frei ändern können, die Ausdehnung in Betracht gezogen werden soll.

Hievon ausgehend, haben wir vor kurzem gezeigt, daß in dem Boden eines Dockes nur harmlose Drücke auftreten, trotzdem dieser Boden nur eine Stärke hatte, welche zu absolut unzulässigen Spannungen Anlaß gegeben hätte, wenn nicht die Ausdehnung eine mächtige Verspannung des Bodens gegen die Fundamente der Seitenmauern erzeugt hätte.

Man wird den Einfluß der Veränderungen auf armiertes Mauerwerk ferner nur bestimmen können, nachdem man die Gesetze ihrer Veränderungen bestimmt hat.

Wirkungen der hygrometrischen Veränderungen.

Man weiß, daß alle für Mauerwerk gebrauchten Materialien das Volumen vergrößern, sobald sie Wasser aufnehmen und daß sie es im entgegengesetzten Falle vermindern. Wir haben dies für die Mörtel in einem viel stärkeren Maße nachgewiesen, als dies in der Arbeit von *Busing & Schumann* angegeben ist, obwohl die in der Zeitschrift „Der Cement“ veröffentlichte Berechnung ganz richtig ist.

Ein nichtarmiertes Prisma aus reinem Zement, welches durch zwei Jahre an der trockenen Luft gelegen ist, hat sich um 0.24 mm per Meter verlängert, nachdem man es drei Wochen unter Wasser gab.

Ein nichtarmiertes Mörtelprisma, 433 kg reinen Zement auf den Kubikmeter Sand enthaltend, welches 15 Monate im Wasser gelegen hatte, hat sich nach einem zweimonatlichen Aufenthalt an trockener Luft um 0.50 mm zusammengezogen.

Nach den Beobachtungen, welche wir gemacht haben, scheint es, daß sich die durch hygrometrische Einflüsse erzeugten Volumenänderungen in den bereits erhärteten Mörteln mit der fetteren Mischung nicht vermehren. Man könnte vielmehr das Gegenteil konstatieren.

Es gibt nun einen anderen ausgesprochenen Unterschied in den Wirkungen, welche die beiden Ursachen der Volumenänderungen der Mörtel auf die armierten Werkstücke erzeugen.

Während der Mörtel anfängt fest zu werden, besitzt er eine am Anfange sehr große Formbarkeit, welche sich mehr und mehr vermindert. Sie hat zur Folge, daß der Mörtel, der allmählich erhärtet, in ausgedehntem Maße den Wirkungen, die die Armaturen auf ihn ausüben, ausweicht. Auch der Mörtel der armierten Stücke, die an der Luft bleiben, erhält schließlich eine größere Dauer, als wenn er ganz frei sich zusammenziehen könnte.

Das Umgekehrte soll sich an den armierten Stücken zeigen, die im Wasser verwendet werden, aber wir hatten nie Gelegenheit, eine Erhöhung der guten Eigenschaften zu beobachten.

Die Wirkungen der hygrometrischen Veränderungen auf die vollständig erhärteten Mörtel sind sehr verschieden von denjenigen, welche beim allmählichen Erhärten desselben resultieren; es gleicht einem Kampf zwischen den beiden vereinigten Materialien, deren Elastizitätskoeffizienten bei ihren schließlichen Werten angekommen sind.

Die Unterschiede zwischen der Länge, welche jedes der beiden Materialien einzunehmen strebt und welche ihnen die Verbindung auferlegt, sind umgekehrt proportional ihren Elastizitätsmodulen.

Daraus folgt, daß man im voraus darauf Bedacht nehmen sollte, daß die Differenz der Längenänderungen eines Mörtel, je nachdem er armiert oder nicht armiert ist, bedeutend größer sein wird, wenn er anfängt zu erhärten, als während der folgenden hygrometrischen Änderungen, und der Versuch hat das auch bestätigt.

Ebenso resultiert daraus, daß die Volumsänderungen, welche durch die hygrometrischen Veränderungen in den erhärteten Mörteln hervorgebracht werden, geringer sind als diejenigen, die beim allmählichen Erhärten auftreten, denn hiebei können innere Wirkungen daraus entstehen, besonders Biegungsspannungen der Armaturen, welche 4 bis 6 kg/mm^2 Eisenquerschnitt erreichen.

Im Gegensatz zu dem, was die Erfolge des langsamen Erhärtens sichert, scheinen die Wirkungen der hygrometrischen Änderungen umso gefährlicher zu sein, je magerer die Mischung, also je geringer die Widerstandsfähigkeit ist, während doch die inneren Spannungen zum mindesten gleich groß bleiben.

Es ist noch hinzuzufügen, daß diese Übelstände für stets der Luft ausgesetztes Mauerwerk nicht fühlbar sind, weil die Feuchtigkeitsänderungen der Luft sehr schwache Wirkung haben. Die Frage hat nur Wichtigkeit für an der Luft verfertigte Werkstücke, die vor dem Unterwassersetzen zu erhärten anfangen und die später doch im Wasser verbleiben sollen.

Das ist der Fall bei Piloten, Caissons etc. Wenn man diese bis zu ihrer eigentlichen Verwendung feucht erhält, vermeidet man nicht allein die Risse, die da oft entstehen — der Versuch hat dies bewiesen — sondern auch die Änderungen der inneren Kräfte, deren Wirkung jedenfalls nicht vorteilhaft sein kann.

Es wäre interessant und nützlich, experimentell die Wirkungen zu bestimmen, welche man bekommen würde, wenn man die Konstruktionen, die an der Luft bleiben sollen, durch einige Wochen so feucht als möglich erhalten würde. Es ist begreiflich, daß man dadurch das endgiltige Zusammenziehen, also auch die Übelstände, die daraus resultieren, vermindern würde, d. i. die Tendenz des Rissigwerdens, die ungünstige Beeinflußung der Elastizität und des Widerstandes und der inneren Kräfte, erzeugt durch die gegenseitige Wirkung des Eisens und Betons.

Zum Schlusse des Gesagten sei noch auf die Tatsache hingewiesen, welche sich unseren Beobachtungen zu entziehen scheint und welche zu untersuchen sehr vorteilhaft wäre. Es hat den Anschein, als ob die armierten Werkstücke, welche Belastungsproben unterworfen worden waren, gegen Feuchtigkeitsschwankungen sehr wenig empfindlich gewesen wären. Man wird diese Tatsache wahrscheinlich finden, wenn man sieht, daß die Belastungen den Elastizitätskoeffizienten in sehr starkem Maße herabmindern.

Biegungsfestigkeit des armierten Betons.

Im „Génie civil“ wurde über die ersten Versuche zur Feststellung der Eigenschaften des armierten Betons bezüglich seines Widerstandes gegen Zug berichtet.

Indem man mit der Säge Mörtelstäbe von den Armaturen eines Prismas, dessen beanspruchte Fasern eine Längenänderung von nahezu 2 mm pro laufenden Meter ertragen hatten, lostrennte, hat man einerseits erkannt, daß sie nicht allein ihren Zusammenhang, sondern auch ihre ursprüngliche Festigkeit bewahrt hatten.

Andererseits beseitigte man die den Prismen durch Biegung auferlegten Totalanstrengungen gänzlich und rechnete den Teil, welchem der Widerstand der Armaturen das Gleichgewicht hielt, abgesondert von den Biegungsbeanspruchungen, welche Verlängerungen der Mörtelfasern erzeugt hatten.

Diese Versuche haben Einwendungen hervorgerufen, die begründet erscheinen konnten. Man hatte dabei nur die Deformationen des Mörtels gemessen und um daraus auf diejenigen der Armaturen zu schließen, hätte man die allgemein giltige Hypothese von der Erhaltung der ebenen Schnitte einführen müssen. Außerdem wurde das möglichste für die Bewahrheitung dieser Hypothese gethan, indem man die Beobachtungen auf die zentralen Teile der Prismen (BC der Fig. 1) beschränkte, wo die Scherkräfte, welche die ebenen Schnitte auszubiegen suchen, verschwinden.

Nichtsdestoweniger hat man, um jede Unsicherheit in diesem Punkte, der einzige, welcher bestritten hätte werden können, verschwinden zu lassen, neue Zug- und Biegungsversuche gemacht, bei welchen man die Verlängerungen der Armaturen direkt und zur selben Zeit wie die Deformationen des Mörtels gemessen hat.

Die Zugversuche sind besonders einfach und scheinen geschützt vor jedem Irrtum. Mörtelprismen mit quadratischem Querschnitt von 47 mm Seitenlänge, symmetrisch armiert mit vier Drähten von 4,4 mm Durchmesser, sind dem direkten Zuge unterworfen worden und man hat bei jeder Belastung für die Armaturen die Verlängerung A und für den Mörtel die Verlängerung A' gemessen.

Wenn man den Elastizitätskoeffizienten der Armaturen mit E bezeichnet und ihren vollen Querschnitt mit S , so ist es klar, daß, wenn sie bei der Belastung P die relative Verlängerung A angenommen, einen Widerstand SAE geleistet haben und daß die Differenz $P - SAE$ die totale Beanspruchung des Betons darstellt. Indem man diesen Wert durch den Querschnitt des Mörtels dividiert, hat man die Beanspruchung pro Quadratcentimeter, welche er bei der Verlängerung A' erhalten hat.

Auf dieselbe Weise ist man bei den Biegun-
gsv_{er}s_uch_en vorgegangen; außer der Messung der Ver-
kürzungen der gedrückten Fasern des Mörtels sind auch
die zur Bestimmung der neutralen Achse notwendigen
Rechnungen komplizierter gewesen und ließen minimale
Fehler zu, die jedoch zu klein waren, um die aus den
Versuchen hervorgegangenen Folgerungen einzuschränken.

Die Gesetze, welche aus den ersten Versuchen aufge-
stellt wurden, sind hiedurch vollkommen bestätigt, ergänzt
und auch auf die Wirkungen der wiederholten Anstrengungen
ausgedehnt worden.

Um die bei den so zahlreichen und verschiedenen
Versuchen, die ausgeführt worden sind, beobachteten Tat-
sachen ohne irgend eine Ausnahme leicht und genau fest-
stellen zu können, hat man das Schaubild 4 konstruiert, und
zwar für den einfachsten Fall des symmetrischen Zuges. Man
hat als Ordinaten die auf das Prisma successive einwirkenden
Totalbelastungen und als Abszissen die korrespondierenden
Verlängerungen der Armaturen aufgetragen. Die Ver-
längerungen des Mörtels, welche ebenfalls gemessen wurden,
sind denjenigen der Armaturen fast ganz gleich gefunden
worden, und zwar bei den dem einfachen Zuge unterzogenen
Prismen in den mittleren Teilen, bei den der Biegung unter-
zogenen Prismen in denjenigen Teilen, welche weit genug
von den Kraftangriffspunkten entfernt gewesen sind, um also
den Wirkungen der Scherkräfte nicht ausgesetzt zu sein.

Sobald die Last einen gewissen Wert Oa nicht über-
schreitet, haben die Verlängerungen regelmäßig zugenommen
und sind sehr gering gewesen, dann sind sie fast plötzlich
viel größer geworden, aber haben bald wieder einen regel-
mäßigen Fortgang genommen, was der gerade Teil der Linie
 AB darstellt.

Die Belastung ist mit \overline{Ob} abgeschlossen worden, dann
ist sie allmählich bis auf \emptyset reduziert worden und es sind
Verkürzungen eingetreten, die durch die punktierte Linie BC
angezeigt sind, welche, außer in der Nähe der äußersten
Punkte, geradlinig ist.

Eine Reihe neuer Belastungen bis \overline{Ob} und Entlastungen
haben die durch CB' , $B'C'$, $C'B''$, $B''C''$ etc. dargestellten
Deformationen hervorgebracht, das heißt durch Kurven, die
mehr und mehr sich von der vertikalen Achse Ob entfernen
und immer weniger steil sind.

Die Wechselfolge von Belastung und Entlastung ist
fortgesetzt worden bis zur Feststellung des definitiven Still-

standes, und man hat beobachtet, daß die Punkte B sowie die Punkte C sich immer langsamer einander nähern bis zu den Grenzen C^n bzw. B^n und daß in den Prismen, in denen keine vorherigen inneren Kräfte, erzeugt durch das allmähliche Erhärten unter Wasser oder an der Luft, aufgetreten sind, der endliche Wert OC^n der bleibenden Verlängerung immer niedriger gelegen war als $\frac{1}{5}$ und oft $\frac{1}{10}$ der totalen Verlängerung CB bei der Belastung Ob .

Um noch andere Merkmale der erhaltenen Resultate zu präzisieren, ist es unerläßlich die Kurve zu zeichnen, welche die durch die Armaturen hervorgebrachten Spannungen unter den verschiedenen Belastungen darstellt. Das ist selbstverständlich die Gerade OF , deren Neigung gegen den Horizont das Produkt aus dem Elastizitätskoeffizienten und dem Querschnitte der Armatur ist.

M sei irgend ein Punkt der Deformationskurve, NP stellt die durch die Armaturen erzeugte Spannung vor, wenn das armierte Prisma die Belastung \overline{PM} aufnimmt, folglich ist die im Mörtel hervorgerufene Spannung gleich der Strecke \overline{MN} .

Die Beobachtungen, auf welche man durch das Studium der Ergebnisse gekommen ist, sind folgende: In der ersten Periode OA , wo die Verlängerung \overline{aA} nicht viel die Verlängerung überschreitet, die ein Prisma vom selben aber nicht armierten Mörtel vor dem Bruche annehmen würde, ist die Spannung beim armierten Mörtel gleich jener des nicht armierten. Die zwei verbundenen Materialien verhalten sich so, als ob sie unabhängig von einander wären und verteilt sich deren Anstrengung proportional ihren Elastizitätskoeffizienten.

Über diese Grenze hinaus werden die Verlängerungen rasch größer, die Spannung \overline{MN} des Mörtels dagegen nimmt sehr langsam zu und daher wird dessen Elastizitätskoeffizient sehr niedrig.

Besonders wichtig für die Praxis ist es, im Falle wiederholter Anstrengungen dies klar zu legen, das heißt $B^n Q$, den Wert des definitiven Widerstandes, zu bestimmen, welchen der Mörtel leistet wenn die Belastungen unendlich oft wiederholt worden sind ohne die Grenze \overline{Ob} und \overline{QR} (d. i. der Unterschied der Beanspruchung, welcher zwischen der Armatur und dem Mörtel zur selben Zeit besteht) zu überschreiten,

In den Prismen, welche seit ihrer Verfertigung an der Luft waren und die beim Versuch eine Verlängerung max.

$bB^n = 0.90 \text{ mm}$ erlitten hatten, ist der schließliche Wert der Spannung $B^n Q$ im Mörtel gleich gewesen 0.70 der Spannung max. \overline{MN} und etwas höher gelegen als der Widerstand desselben, jedoch nicht armierten Betons.

In den unter Wasser befindlichen und erst einige Tage vor dem Versuch an die Luft gestellten Prismen, und zwar dies deshalb, um die inneren Kräfte, die durch das langsame Erhärten hervorgerufen wurden, auszumerzen, ist die schließliche Spannung größer gewesen, als 0.70 der max. Spannung.

Bezüglich der Elastizität haben also die Resultate der Spannungsversuche des armierten Betons folgendes ergeben:

Der Mörtel oder der armierte Beton besitzt einen Elastizitätskoeffizienten gleich demjenigen des nichtarmierten Mörtels, sobald seine Verlängerung nicht beträchtlich den Wert überschreitet, der beim nichtarmierten Mörtel den Bruch herbeiführen würde.

Wenn man die Belastung immer weiter fortsetzt, sinkt der Elastizitätskoeffizient beinahe bis zur Null herab.

Bei der Entlastung hat der Elastizitätskoeffizient einen umso kleineren Wert, je größer die Deformation gewesen ist.

Wenn man die Belastungen und Entlastungen mit derselben Lastgrenze wiederholt, vermindert sich der Elastizitätskoeffizient noch stärker, aber nur bis zu einer gewissen Grenze. In diesem Punkte angekommen, verhalten sich die armierten und der wiederholten gleichen Beanspruchung unterworfenen Stücke wie vollkommen elastische Körper und ihre Deformationen sind streng proportional den Lasten.

Nach diesen Feststellungen wäre gewiß von Wichtigkeit, zu untersuchen, was geschehen würde, wenn ein armiertes Werkstück infolge eines Zufalles eine größere Belastung als die bei den bisherigen Versuchen wiederholt auftretenden erhalten würde. Das Gesetz der Erscheinung, das sich hiebei zeigt, ist dargestellt durch die Kurve $B^n DE$. Sie zeigt, daß in diesem Falle der Beton, nach einer gewissen Vermehrung der Last, die minimale Widerstandskraft, welche er von den wiederholten Anstrengungen gehabt hat, wieder erhält. Das ist eine wichtige Eigenschaft, welche in manchen Fällen schätzenswert sein könnte.

Die neuen Versuche, welche hierüber zum erstenmal gemacht wurden, bringen einige Klarheit über das Verhalten des armierten Betons, wenn er einer einzigen starken Belastung oder wiederholten Spannungen unterworfen ist.

Diese Eigenschaften konnten, wie es scheint, weder durch theoretische Gedankenfolge, noch durch Untersuchung der Resultate der vorhergegangenen Versuche bewiesen werden.

Einfluß des Zusammenziehens und Ausdehnens auf die Deformation und die Kräfte.

Die Gesetze, welche soeben aufgestellt wurden, sind jene, die sich in den armierten Werkstücken verwirklichen, die in einer solchen Weise der Luft und dem Wasser ausgesetzt worden sind, daß die inneren Kräfte beim Versuch vernachlässigt werden konnten. Es ist leicht zu konstatieren, in welchem Sinne sie durch das Zusammenziehen und Ausdehnen abgeändert werden.

Man hat gesehen, daß von dem Augenblick an, wo der Beton eine gewisse Verlängerung, welche bei allen überanstrengten armierten Bauwerken leicht überschritten wird, erfährt, er einen der Vergrößerung der Deformation fast identischen Widerstand liefert. Daraus ergibt sich, daß wenn man bei armierten Bauwerken eine äußere Kraft angreifen läßt, seien diese nun unter Wasser oder der Luft ausgesetzt, in jedem Fall die Armaturen denselben Widerstand liefern werden wie der Beton selbst und folglich auch dieselbe absolute Verlängerung annehmen werden. Die relative Verlängerung wird natürlich größer sein in den der Luft ausgesetzten Bauwerken, die ja vor dem Versuch gedrückt waren, d. h. unter ihre wahre Länge verkürzt waren, während in den unter Wasser befindlichen Bauwerken schon Verlängerungen vorhanden sind.

Die Deformationen müssen also unter sonst gleichen Umständen bei Bauwerken an der Luft größer werden, als bei den vor dem Versuch im Wasser befindlichen Bauwerken.

Der Einfluß des Zusammenziehens und Ausdehnens auf die Deformation der armierten Bauwerke ist umso größer, je größer die Kräfte sind, welche darin auftreten. Tatsächlich verschiebt das Zusammenziehen an der Luft, bei welchem die gezogenen Fasern der auf Biegung beanspruchten armierten Prismen mehr deformiert werden, als die gedrückten, die neutrale Achse gegen diese letzteren, wodurch deren Querschnitt verkleinert wird.

Es resultiert daraus notgedrungen eine Vermehrung der spezifischen Spannungen, die sich dort entwickeln müssen,

um der Spannung der Armaturen und der gezogenen Betonfasern das Gleichgewicht zu halten.

Außerdem bewirkt das Zusammenziehen des Betons, welches in den den Armaturen benachbarten Fasern Zugspannungen erzeugt, in den gegenüberliegenden Fasern Drücke, derart, daß das Zusammenziehen eine doppelte Wirkung hat, nämlich in den den Armaturen gegenüberliegenden Fasern vor der Belastung Druckspannungen zu schaffen und dann die durch die Last entwickelten Drücke zu vergrößern. Die Wirkung der Dilatationen ist selbstverständlich genau die entgegengesetzte.

Der Versuch beweist diese Schlußfolgerungen.

Widerstand des Betons gegen Druck.

Im allgemeinen vermehrt man den Widerstand des Betons nicht durch Einfügung von Eisenstäben in denjenigen Teilen der armierten Bauwerke, die nur Druckbeanspruchungen ausgesetzt sind. Er folgt also wohlbekannten Gesetzen, zu welchen unsere Versuche nichts hinzugefügt haben. Wir stellen nichtsdestoweniger die Deformationskurve für ein Prisma aus einer Mörtelmischung zu 600 kg dar, welche der Direktor des Laboratoriums der École des ponts et chaussées nach 30tägiger Erhärtung an der Luft der Erprobung unterzogen hat.

Das für die Praxis Bemerkenswerte dieser Kurve ist folgendes (Fig. 5):

Es sind die Verkürzungen proportional den Drücken und folglich bleibt der Elastizitätskoeffizient beinahe bis zu einer zu zwei Drittel des maximalen Widerstandes reichenden Last konstant. Die Deformationen werden bei größeren Kräften immer größer und erreichen relative sehr große Werte. Man wird ferner einsehen, daß diese Eigenschaft einen wichtigen Einfluß auf die Bruchfestigkeit der Mauerwerke im allgemeinen und auf armierten Beton im speziellen ausübt.

Man weiß, daß der in feinen Fugen angewendete Mörtel viel stärkere Drücke, ohne zermalmt zu werden, aushält, als es Prismen von genügender Länge vermögen und M. Harel de la Noé hat aus dieser Tatsache und aus den theoretischen Folgerungen ganz richtig geschlossen, daß man die Widerstandskraft des Betons vergrößern würde, wenn man ihn mit zur Druckkraft senkrecht stehenden Armaturen versieht. Der Versuch bestätigt dies, aber er fördert eine Tatsache zutage, die man nicht übersehen darf.

Man hat gesehen, daß die Mörtel und Betone das Bestreben zeigen, ihr Volumen zu verkleinern, wenn sie sich in der Luft befinden. Die Armaturen behindern dieses Zusammenziehen umso mehr, je stärker und zahlreicher sie sind und eine je größere Anzahl von Richtungen sie nehmen.

Es ist also wahrscheinlich, daß die Spannung, die während des allmählichen Erhärtens daraus resultiert, die Eigenschaften des Betons im entgegengesetzten Sinne zu den Drücken beeinflussen muß, eine günstige Wirkung zeigt, auf welche M. C a n d l o t hingewiesen hat.

Nach vergleichenden Versuchen mit zwei Prismen, von denen eines wie gewöhnlich durch der Länge nach laufende Eisenstäbe in den gezogenen Fasern, das andere auch noch durch gekreuzte Eisenstäbe in den gedrückten Fasern armiert waren, hat sich folgendes ergeben: der Elastizitätskoeffizient der gedrückten Fasern in dem ersten Prisma lag zweimal höher als im zweiten. Hierbei betrug der Kubikinhalt der Eiseneinlagen in den gedrückten Fasern $\frac{1}{100}$ desjenigen des Mörtels.

Diese Prismen, die durch das Gleiten der Längsarmaturen gelitten hatten, haben keinen Aufschluß über die Zermahlungswiderstände geliefert, aber es ist wahrscheinlich, daß sie sich proportional den Elastizitätskoeffizienten ändern; wie es überhaupt bei den Mörteln derselben Mischung vorkommt, welche Stößen oder verschiedenen Drücken unterworfen sind.

Es wäre interessant, zahlreichere methodische Versuche hierüber anzustellen und zu untersuchen, in welchem Maße die Qualitätsverminderung, welche die transversalen Armaturen im gedrückten Beton verursachen, durch die Mitwirkung des Widerstandes der Armaturen aufgewogen wird. Diese Mitwirkung hat erst dann Wichtigkeit, wenn die Elastizitätsgrenze überschritten ist.

Es geht von selbst hervor, daß eine analoge aber weniger starke Qualitätsverminderung auch in den gezogenen und mit der Länge nach laufenden Armierungen versehenen Fasern eintreten wird. Wir haben dies in allen unseren Versuchen festgestellt (mehr als 50). Die neutrale Achse war i m m e r trotz der Eiseneinlagen in der Mitte der rechtwinkligen Querschnitte der an der Luft stehenden Bauwerke gelegen, so als ob der Beton in der ganzen Masse denselben Elastizitätskoeffizienten gehabt hätte, während die neutrale Achse, welche sich sonst immer von den weniger widerstandsfähigen Teilen entfernt, sich eigentlich den

Armaturen hätte nähern müssen, deren Elastizitätscoefficient im Mittel ja zehnmal größer ist, als derjenige des Betons, welcher das Eisen ersetzt.

Widerstand des Betons gegen Abscherung und Gleiten.

Obwohl das Abscheren und Gleiten viel Ähnlichkeit haben, repräsentieren sie doch wesentliche Unterschiede.

Beim Abscheren wird der Bruch erzeugt durch Verschiebung in Richtungen, welche mit der Richtung der Kraft einen Winkel von nahe 45° einschließen, was auch die Versuche M. Mesnagers klar bewiesen haben.

Die im Beton derart festsetzenden Armaturen, daß sie sich nicht leicht verschoben werden, können nur parallel zu den Längskräften gleiten.

Abscherung.

Die Versuche von M. Mesnager gehen darauf hinaus, zu beweisen, daß der Widerstand der Mörtel gegen Abscheren ihren Zugwiderstand übertrifft, wie man dies durch die gebräuchlichen Untersuchungen feststellen kann. Aus den Versuchen, die wohl zu wenig zahlreich angestellt wurden, um daraus einen allgemeinen Schluß zu ziehen, hat er eine Differenz von 20 bis 30% zwischen diesen beiden Widerständen gefunden.

Eine kürzlich beobachtete Tatsache hat einige Klarheit gebracht bezüglich der Dehnbarkeit des Zementes, der gleichzeitig enormen Scherbeanspruchungen und sonstigen zusammengesetzten Kräften unterworfen war. Man hatte auf den Felsen von Gorké-Bian eine Boje aus hohlem Eisen von 19 cm Durchmesser, mit Zementmörtel gefüllt, aufgestellt. Die Wellen hatten diese Boje nach einem Krümmungshalbmesser von 0.55 m, auf der Achse der Boje gemessen, verbogen, und man mußte erwarten, daß der Zement zerbricht worden wäre. Nun hat man aber nach dem Durchschneiden der Boje längs der ebenen Fläche der Biegungsachse konstatiert, daß der Zement nur einige oberflächliche Abschiebungen zeigte, zwischen denen man unversehrte Stücke fand, deren Deformationen auf Verschiebungen der Fasern in der Größe von wenigstens 200 mm pro Meter hinwiesen.

Man muß daraus schließen, daß die von den armierten Betonen ohne Bruch aufgenommenen Verlängerungen viel größer sein können als man es dachte; die Mörtel oder

Betone können enorme Schubkräfte aufnehmen, wenn sie gedrückt werden, wie dies im Innern der Boje von Gorké-Bian stattfand.

Diese Tatsache, welche von Wichtigkeit ist bezüglich des Widerstandes von Mauerwerk bei tiefen Gründungen, die starken Drücken ausgesetzt sind, scheint nicht mit den Studien über armierte Konstruktionen unter den gewöhnlichen Bedingungen übereinzustimmen, jedoch mit den bezüglichen Beobachtungen über den Schub der Armaturen verglichen, würden sie dieselben vervollständigen und auf Folgerungen führen, welche nicht ohne praktisches Interesse sein werden.

Gleiten.

Wir haben zahlreiche Versuche über das Gleiten der Armaturen gemacht und hiebei verschiedene Verfahren eingeschlagen, doch alle darauf hinausgehend, die Längsverschiebungen festgelegter Punkte der Armaturen durch Vergleich mit den benachbarten Punkten der Seitenflächen des Prismas, welche vor Aufbringung der Lasten in demselben Querschnitt waren, zu messen.

Die aus den verschiedenen Prismen erhaltenen Resultate sind sehr verschieden in ihrem absoluten Werte gewesen, doch als man sie graphisch durch Schaubilder darstellte, in welchen man als Ordinaten die Lasten, als Abszissen die dadurch entstandenen Verschiebungen aufgetragen hat, sah man deutlich den gleichartigen Gang der Deformationen.

Die Verschiebungen oder relativen Ortsveränderungen der durch die minimale Entfernung von 5—7 mm getrennten Punkte der Armatur und des einhüllenden Betons sind äußerst gering gewesen, insolange die die Verschiebung leistenden Kräfte gewisse Werte, welche augenscheinlich mit der Elastizitätsgrenze übereinstimmen, nicht überschritten haben; später haben sich die Verschiebungen fast plötzlich sehr rasch vergrößert und sie haben beim Wachsen der Last um $\frac{1}{10}$ — $\frac{1}{5}$ der ursprünglichen Größe relativ bedeutende Werte, d. i. 10 bis 30 mm per Meter angenommen.

Man wird in der Fig. 6 die Analogie des Verhaltens dieser Kurven mit denjenigen der Kurve der Zugbeanspruchungen des armierten Betons bemerken, welches Verhalten sich so sehr von dem unterscheidet, was man nach den Versuchen über Mörtel und nichtarmierte Betone vermutete. Jedoch sind die Werte der Deformationen bei den Verschiebungen viel stärker als bei der Zugbeanspruchung (10—15 mal beiläufig) und man würde versucht sein, dieses

Resultat zu bezweifeln, wenn das Verhalten des Mörtels der Boje von Gorlé-Bian nicht noch viel größere Verschiebungen gezeigt hätte.

Man muß aber beachten, daß die fraglichen Kurven, welche einen sehr zuverlässigen, praktischen Wert haben, keine wissenschaftlich präzierte Erklärung besitzen. Tatsächlich sind, aus Gründen, die hier nicht entwickelt werden können, die spezifischen Gleitbeanspruchungen der Berührungsfläche längs der Armaturen keineswegs proportional den Belastungen der Prismen; man hat als Abszissen die Verschiebungen der Armaturen, als Ordinaten die Belastungen aufgetragen. Andererseits ändern sich diese spezifischen Beanspruchungen mit der Entfernung von den Armaturen; denn man zieht ja zylindrische Mörtelringe in Betracht, auf deren Umfänge sich diese Spannungen verteilen. Je weiter sich diese Umfänge von den Armaturen entfernen, desto größer werden sie und hiemit ändern sich auch die spezifischen Beanspruchungen.

Der Schub ist also die Resultante, zusammengesetzt aus Verschiebungen, die in den verschiedenen Kräftenunterworfenen Fasern noch hinzukommen.

Dieser Mangel der wissenschaftlichen Grundlage, welche die Mörtel als spröde Körper betrachtet, beeinträchtigt nichts an der Wichtigkeit der Feststellung einer bedeutenden Dehnbarkeit bezüglich des Gleitens, die mit dem Druck, der auf sie ausgeübt wird, wächst.

Die Beobachtungen haben sich nicht allein auf die Deformationen, sondern auch auf die Gleitwiderstände der Armaturen bezogen. Ihre für die Praxis nützlichen Resultate können aus analogen Gründen nicht durch die elementaren Gesetze für das Gleiten abgeleitet werden. Es ist daher nicht uninteressant, die für die Praxis erhaltenen Resultate kennen zu lernen.

Man hat unter der in der Figur 1 dargestellten Art prismatische Stäbe belastet, u. zw. bis zum Bruche durch Schubbeanspruchung der Armaturen. In Ermangelung eines Besseren hat man die gebräuchliche und ungenaue Hypothese gelten lassen, d. i. die Proportionalität der Gleit- zu den Scherkräften, und man hat Gleitwiderstände gefunden von 5 bis 12 kg/cm^2 Berührungsfläche für an der Luft angewendeten Beton, der aus 300 kg Zement auf 1 m^3 einer Mischung aus gleichen Teilen gutem Sand und feinem Kies bestand. Die Armaturen waren aus gewalzten Eisendrähten von 4.4 mm Durchmesser, deren Oberfläche vollkommen blank und glänzend war.

Der Widerstand ist bis zu 18 *kg* gestiegen bei Prismen aus demselben Beton, armiert mit Walzeisen von 6 *mm* Durchmesser, deren Oberfläche so beschaffen war wie diejenige der Eisenstäbe, die man in der Praxis anwendet.

Bei einer anderen Serie von Prismen, die aus Mörtel von 433 *kg* Zement per Kubikmeter Sand bestanden und im Wasser verwendet wurden und deren Armaturen leicht eingerostete Eisenstäbe mit 4.25 *mm* Durchmesser waren, lag der Schubwiderstand, auf dieselbe Weise wie früher gerechnet, zwischen 23 und 35 *kg*.

Man hat für die an der Luft angewendeten Mörtel festgestellt, daß die Menge des zum Anmachen des Mörtels verwendeten Wassers einen bedeutenden Einfluß auf das Anhaften der Armaturen ausübt. Bei drei sonst identischen Prismen hat man einen mit Wasserüberschuß angemachten Beton, dann normalen und dann zu trockenen Beton angewendet und die bezüglichen Gleitwiderstände waren 11—12—5 *kg*.

Diese Resultate stimmen mit den Angaben der Praktiker überein und man begreift das schwache Anhaften des zu trockenen Betons an den Armaturen, die nur in einigen Punkten aufliegen, während im Beton, wie er von den Versuchsarbeitern gemacht wird, ein Überschuß von Wasser, dem Zement die nötige Konsistenz gibt, damit er leicht zwischen die einzelnen Sandkörner eindringen kann und alle Lücken um die Armaturen herum ausfüllt. Jedesmal aber haben die Vorteile des nassen Betons bezüglich des Anhaftens der Armaturen in einer namhaften Verminderung des Zug- und Druckwiderstandes eine Grenze, was M. Candlot bewiesen hat.

Die soeben mitgeteilten Resultate müssen erst an Mauerwerken von normalen Dimensionen bewiesen werden, denn die Einbringung des Betons geschieht unter ganz anderen speziellen Bedingungen, als bei unseren Versuchsprismen, welche nur eine Breite und Höhe von 6 *cm* haben, auch wenn die Dimensionen sonst klein sind.

Man wird sofort bemerken, um wie viel die festgestellten Widerstände unter den Ziffern 40 bis 50 *kg* geblieben sind, welche man allgemein nach den Versuchen Bauschingers und Jollys zuläßt.

Ein Teil dieser Differenz scheint darauf zurückführbar zu sein, dass die Armaturen der auf Biegung beanspruchten Mauerwerke von Beton umgeben sind, der sehr starke Zugkräfte aushält, die im allgemeinen viel höher liegen als die Elastizitätsgrenze, während die Versuche der früher an-

geführten Beobachter sich auf Eisenstäbe bezogen, die dicht im Beton eingeschlossen waren, wo außer der Gleitung die anderen Kräfte relativ vernachlässigt waren.

Die konstatierten Tatsachen scheinen mit den Resultaten der Experimente des Major Hartmann und denen von Mesnager und verschiedener anderer entwickelten Theorien übereinzustimmen. Das Gleiten, welches eine entscheidende Rolle in der Deformation der Metalle und sogar aller Körper spielt, setzt derselben zwei Widerstände entgegen, die Festigkeit der Materie und die Reibungswiderstände, welche proportional den auf die Gleitfugen normalen Drücken sind. Es ist also natürlich, dass die Gleit- und Scherwiderstände durch Kräfte allerart, die auf den armierten Beton wirken, beeinflusst sind und daß sie stärker sind in den dicht an die Eisenstäbe angeschlossenen Teilen, als in den Teilen der armierten Prismen, deren Beton einen Teil seiner Cohäsion durch die die Elastizitätsgrenze überschreitenden Verlängerungen, welche die Biegemomente hervorrufen, verloren hat.

Wenn man noch bemerkt, daß das Gleiten der Armaturen und die Deformation der ebenen Schnitte die Verbiegungen vermehren, kommt man zu einer den elementaren und gewöhnlichen Begriffen des Widerstandes der Materialien gegenteiligen Schlussfolgerung, nämlich, daß die Wirkungen der Biegemomente sehr stark den Widerstand des Betons hinsichtlich der Scherkräfte und des Gleitens beeinflussen können und daß die Wirkungen der Scherkräfte auf die Deformationen nicht absolut weggelassen werden können.

Man wird begreifen, daß diese Folgerungen die Wahl der Formen, Dimensionen und Abstände der Quer-Armaturen beeinflussen müssen, jedoch kann man diese heikle Frage nicht kurz behandeln.

Wirkungen der Risse.

Im Vorhergehenden hat man immer vorausgesetzt, daß der armierte Beton einheitlich im Zusammenhang war und die Verlängerungen durch die aufgelegten Lasten nicht zum Bruche führten. Aus Gründen, die hier nicht bezeichnet zu werden brauchen, ist es besonders bei den der Luft ausgesetzten Konstruktionen oft anders und es ist wichtig, die Wirkungen der Risse, die die Kontinuität der beanspruchten Fasern unterbrechen zu studieren.

Im allgemeinen begnügen sich die Praktiker, um jeden Fehler von dieser Seite zu vermeiden, mit der Voraussetzung,

daß der Beton keinen Zugwiderstand habe. Sie bestimmen in willkürlicher Weise die Stellung der neutralen Achse und daher auch die Stärke der gedrückten Fasern, die abhängig gemacht werden von der vermutlichen äußersten Beanspruchung.

Es ist leicht, die Stellung, welche die Achse einnehmen wird, genau zu bestimmen, denn tatsächlich spielt der gezogene Beton keine Rolle und wir haben im „Génie civil“ die Formeln wiedergegeben, die zu dieser Hypothese führten. Aber seitdem haben uns die nachstehenden Betrachtungen gezeigt, daß sie unhaltbar wären.

In der ersten kritischen Periode, und das ist offenbar diejenige, für welche man sich vorsehen muß, bilden sich im allgemeinen nur eine kleine Anzahl von weit auseinander liegenden Rissen. Die Kurven, bei denen die Ordinaten die Zugspannungen des Betons und der Armaturen in der Nähe eines dieser Risse bezeichnen, zeigen deutlich die in der Fig. 7 angegebenen Formen.

Die Zugbeanspruchung des Betons, deren Wert in den gesunden Teilen aA ist, sinkt an der Stelle des Risses auf Null herunter.

Im Gegensatz hiezu erhebt sich die Zugbeanspruchung der Armaturen, deren Vermehrung sich mit dem allmählichen Verschwinden derjenigen des Betons ausgleichen soll, von bB bis cC .

Die Differenz der Züge in den benachbarten Querschnitten zieht notgedrungen Längswirkungen durch das Anhaften des Eisens und des Betons nach sich, die auch Gleitwiderstände hervorrufen, deren Werte durch die Ordinaten der Kurve DEF dargestellt sind.

Jede Kraft bringt eine relative Ortsveränderung hervor, der Riß öffnet sich also, die Biegung des Bauwerkstückes überträgt sich in die Nachbarschaft und die neutrale Achse nähert sich den gedrückten Fasern, deren Querschnitt folglich vermindert wird, während der einheitliche Druck sich vermehrt.

Diese Erscheinung ist verschieden, je nachdem sich der Beton im Wasser oder an der Luft befindet und folglich je nachdem die den Armaturen zunächst liegenden Fasern einen anfänglichen Zug oder Druck besitzen.

Es ist zweifellos richtig, daß die Wirkungen der Risse umso bemerkenswerter sind, je größer die Durchmesser der Armaturen gegenüber den allgemeinen Dimensionen der Mauerwerkskörper sind oder, genauer ausgedrückt, je stärker

der Querschnitt der Armaturen im Vergleich zu ihrem Umfang ist. Tatsächlich sind die Spannungsdifferenzen $c C - b B$, welche das Gleiten aufheben sollen, dem Querschnitt der Armaturen proportional, während das Haftvermögen, welches sie ausgleicht, proportional ist ihrem Umfange. Der maximale Wert der Gleitkraft, welche einen Riß erzeugt, und die Länge der von ihrem Platze gerückten Armaturo sind in demselben Sinne von einander verschieden, wie der Querschnitt und der Umfang der Eisenstäbe.

Um die Voraussetzungen zu controlieren, die vom Kongreß der Versuchsmethoden angegeben worden sind, hat man folgende Versuche gemacht:

Mit einem aus 433 *kg* Zement per Kubikmeter Sand bestehenden Mörtel hat man 12 prismatische Körper von 90 *cm* Länge und einem quadratischen Querschnitt von 6 *cm* Seitenlänge gemacht. Drei von diesen waren ohne Armaturen und sollten die Bestimmung haben, die Eigenschaften des Mörtels allein zu charakterisieren.

Jedes der übrigen Prismen ist mit Armaturen von 45 *mm*² Totalquerschnitt ausgerüstet worden, und zwar derart vertheilt, daß in drei Prismen ein einziger Stab, in drei anderen drei Stäbe und in drei weiteren Prismen fünf Stäbe zusammen diesen Querschnitt hatten.

Eine Serie, bestehend aus je einem Prisma dieser vier Typen ist nur an der Luft geblieben und wurde nach Verlauf zweier Monate untersucht. Eine zweite Serie wurde aufeinanderfolgend an die Luft und ins Wasser gebracht, und zwar je nach der notwendigen Maßgabe, um die Zusammenziehungen und Ausdehnungen auf das geringste Maß zu beschränken, also die vor dem Versuche erregten inneren Kräfte aufzuheben. Diese zweite Serie ist wieder nach Verlauf von zwei Monaten den Versuchen unterzogen worden.

Die dritte Serie ist unter Wasser gesetzt worden und sollte auch im Wasser verbleiben, bis die Ausdehnung eine solche Wirkung erzeugt hätte, daß Verlängerungen an den Armaturen kenntlich werden.

An jedem armierten Prisma hat man eine unterbrechende Spalte in die gezogenen Fasern angebracht, wo man eine kleine, mit Wachs bestrichene Blechplatte einschaltete, die mit dem Mörtel keinen Zusammenhang hatte.

Die Prismen der beiden ersten Serien und diejenigen der dritten Serie wurden Biegemomenten unterworfen, bis zu einer viel höheren Grenze steigend als diejenige, welche bei praktischen Erprobungen erlaubt wäre, und man hat die Verlängerungen des gezogenen Mörtels gemessen,

ebenso die Verlängerungen der Armaturen und die Verkürzungen des gedrückten Betons. Diese Maße sind auf Längen von 6 cm, gleich der Dicke der Prismen, einerseits in solchen Teilen, welche die erwähnten Spalten in der Mitte enthielten, andererseits in vollkommen intakten Teilen bezogen worden.

Die Resultate sind vollkommen übereinstimmend mit den Voraussetzungen bei den Prismen der zweiten Serie gewesen, wo die vom langsamen Erhärten des Mörtels herrührenden inneren Spannungen fast Null waren. Man hat dabei eine Vergrößerung der Biegung der Armatur in der Nähe der Risse konstatiert, ebenso das Gleiten des Eisens in seiner Hülle und weiters die Zunahme der Verkürzungen des gedrückten Mörtels.

Die Intensität aller dieser Erscheinungen hat mit dem Durchmesser der Armaturen zugenommen.

In den der Luft ausgesetzten Prismen, deren Armaturen sich während des allmählichen Erhärtens um 0·21—0·30 mm per Meter verkürzt hatten, sind die Wirkungen der anfänglich gemachten Risse gleicher Art gewesen, nur mit einer viel größeren Abweichung und haben unsere Voraussetzungen weit überholt.

In dem mit einem einzigen Eisenstab von 7·7 mm Durchmesser armierten Prisma hat das Gleiten der Armaturen bezüglich der Oberfläche des Mörtels die Größe von 0·15 mm erreicht, was ja sehr nahe der Bruchgrenze ist.

Überdies ist noch zu bemerken, daß der Durchmesser der Armatur dieses Prismas absichtlich viel größer gemacht wurde als in der Praxis zulässig ist, u. zw. zum Zwecke, um die Wirkung der Dimensionen der Armaturen noch klarer zu machen.

Die überraschendste Tatsache war aber der Wert der Verkürzungen der gedrückten Fasern. In dem durch drei Eisendrähte von 4·35 mm Durchmesser armierten Prisma, wo die Dimensionen des Betons und Eisens bewährten praktischen Fällen entsprachen, sind die Verkürzungen nächst der Spalte zehnmal stärker gewesen als in dem unverletzten Teil des Prismas, obwohl die Belastung eine geringe war. Sie ist um 5⁰/₁₀ unter eine bei Belastungsproben zugelassene analoge Last heruntergesunken.

Wenn die Kräfte immer den Verkürzungen proportional wären, müßte man daraus schließen, daß der Riß die Drücke 10 bis 5 mal verstärkt hat in den den Armaturen entgegengesetzten Fasern, was zu ganz absurden Ziffern führen würde. Die aufmerksame Auseinanderhaltung der Resultate

dieser Versuche gibt die Erklärung zu dieser augenscheinlichen Unregelmäßigkeit, indem sie zeigen, daß der Elastizitätskoeffizient des Mörtels eine bedeutende Verminderung an den Ribstellen erlitten hatte. Obgleich die Kräfte proportional sind den elastischen Deformationen, haben sich die Drücke an dem Ort des Risses nicht in sehr starkem Maße vergrößern können, trotz der sehr starken Verkürzungen.

Wie es auch sei, die Änderung der Elastizität an der Stelle des Risses ist unzweifelhaft und die folgende Bemerkung wirft einiges Licht auf die Ursache dieser Änderung. Die Verkürzungen haben sich mit dem Durchmesser der Armaturen besonders stark vergrößert, obwohl der Totalquerschnitt des Eisens in allen Prismen der gleiche war. Nun scheint aber bei gleichem Querschnitt die Größe des Durchmessers die Wirkung des Zusammenziehens nur durch die Starrheit der Eisenstäbe beeinflussen zu können und diese wächst rasch beträchtlich mit ihr. Wir sind folglich gezwungen anzunehmen, daß die Starrheit der Armaturen, welche dem Zusammenziehen einen Widerstand entgegensetzt, der von dem durch die Längskräfte erzeugten sehr verschieden ist, besonders auf die durch Risse geschwächten Querschnitte gewirkt hat und daß im Gegenteil zu dem, was man glauben könnte, die den Armaturen entgegengesetzten Fasern während des Zusammenziehens gespannt geblieben sind und eine ebensolche Änderung der Elastizität erlitten haben, wie wir sie auch konstatiert hatten, wenn das Zusammenziehen verhindert wurde, namentlich in den mit transversalen Armaturen ausgerüsteten Prismen, nur hier viel stärker.

Es wäre noch zu bemerken, daß die fraglichen Prismen während des Erhärtens keinerlei Belastung zu ertragen hatten. Es ist sehr leicht möglich, daß Prismen, welche permanente Lasten zu tragen haben, wie z. B. Balken und Decken, nach dem Ausrüsten nicht dieselben Änderungen erleiden wie unsere Versuchsprismen, weil die Lasten in den höher gelegenen Fasern genügend große Drücke erzeugen, um der Starrheit der Armaturen das Gleichgewicht zu halten.

Es werden noch verschiedene Versuche gemacht werden, um dies zu bewahrheiten.

In Anbetracht so komplizierter Erscheinungen wäre es wohl vermessen, die Wirkungen von Rissen auf den Bruch voraus zu bestimmen, indem man sich nur auf Elastizitätsversuche stützt, welche nicht in der Weise durchgeführt wurden, daß die Zermalmung vor dem Gleiten der Arma-

turen herbeigeführt wurde. Man wird auch Zermalmungsversuche machen müssen, um diese Frage zu beleuchten. Es scheint jedesmal möglich zu sein, mit aller Vorsicht gewisse Voraussetzungen machen zu können, die auf folgenden Betrachtungen basieren und deren allgemeine Bedeutung für die Erklärung der bei den Erhebungen der armierten Konstruktionen konstatierten Tatsachen festgestellt ist.

Wirkungen der Konvexität der Deformationskurven der Mörtel und Betone.

Man hat gesehen, daß die Deformationskurven eine Konvexität zeigen, welche beim Druck ziemlich groß ist, aber viel größer noch bei der Zugbeanspruchung der Beton-eisenkonstruktionen und bei der Gleitbeanspruchung der Armaturen.

Es resultiert daraus, daß, wenn ein Teil des Betons die Elastizitätsgrenze hinsichtlich irgend einer der Deformationen erreicht hat, die Spannungen, welche sich dabei entwickeln, nur mehr in sehr geringem Maße zunehmen, während die benachbarten weniger deformierten Fasern Spannungen erzeugen, die rasch wachsen, um die Überanstrengung auszugleichen und dadurch den Bruch weiter hinauszuschieben.

Es ist dasselbe bei allen dehnbaren Körpern. Wenn in einem Mauerwerkskörper außerdem noch Biegungsbeanspruchungen vorhanden sind, besitzen die gezogenen und gedrückten Teile nicht die entsprechenden Widerstände; der schwächste Teil deformiert sich stärker als die anderen. Die neutrale Achse entfernt sich infolge dessen von diesem Teil und es resultiert daraus eine Vergrößerung des Querschnittes der Fasern, welche den gefährlichsten Beanspruchungen widerstehen müssen.

Wenn die Elastizität in einem Teil der Konstruktion — und hier wird durch diese Betrachtungen die Frage der Risse berührt — infolge von Zusammenziehungen oder aus irgend einer anderen Ursache im voraus herabgemindert ist, vergrößern sich die Deformationen, die Entfernung der neutralen Achse geht immer weiter und neue Fasern kommen denjenigen zu Hilfe, die eine zu geringe Festigkeit haben.

Es ist also immer richtig, die günstigen Wirkungen des wechselseitigen Eingreifens der Fasern der Zement-eisenkonstruktionen als eine sehr wichtige Bedingung zu

bezeichnen. Man weiß, daß der Bruch durch die Wiederholung geringerer Beanspruchungen, vielleicht zwei Drittel oder die Hälfte der Beanspruchung einer einzigen Kraftäußerung, die den Beton bricht, auch zum Bruche gebracht werden kann. Dies gilt nun besonders für Belastungen, deren einmalige Wirkung fast die Widerstandsgrenze erreicht, was die Konvexität der Deformationskurve in der Weise zum Ausdruck bringt, daß die Wirkungen des molekularen Zusammenhanges viel weniger hervortreten scheinen hinsichtlich des Widerstandes gegen wiederholte Beanspruchungen, als desjenigen gegen eine einmalige Maximallast.

Umso mehr ist es erlaubt, Voraussetzungen zu wagen und es scheint also als wahrscheinlich, daß die Risse den Widerstand der Zementeisenkonstruktionen bei wiederholten Beanspruchungen vielmehr vermindern, als bei einer einmaligen Maximalbelastung. Der Versuch allein kann in diesem Fall die Sache klarstellen und wir werden das in Kürze vornehmen.

Endlich ist noch zu erwähnen, daß unsere Experimente sich nur auf die bei der Verfertigung der Versuchskörper gemachten Risse bezogen haben.

Diejenigen, die während der Belastung erzeugt werden, verursachen keine Änderung des Betons. Es ist also wahrscheinlich, daß die Wirkungen, welche daraus resultieren auch für Bauwerke an der Luft analog den Wirkungen sind, welche in den teils an der Luft, teils im Wasser befindlichen Prismen konstatiert worden sind. Letzteres geschah deshalb, um darin die inneren vorgängigen Spannungen und die damit korrespondierenden Verminderungen der Elastizität so viel als möglich auf Null zu reduzieren.

Diese Wirkungen werden also abgeändert und viel kleiner sein als diejenigen, die wir in den nur an der Luft gelassenen Prismen beobachtet haben.

Die Zeichnungen stellen die Resultate dieser Versuche dar und sie sind den Mitgliedern der Versuchs-Kommission vorgelegt worden, die daraus die Richtigkeit der meisten in dieser Broschüre herausgebildeten Gesetze ersehen haben.

Berechnung der Dimensionen und Deformationen.

Aus den durch unsere Experimente konstatierten Tatsachen resultiert eine große Verwicklung der verschiedensten Umstände; es ist aber notwendig, diese Umstände zu kennen,

um die bei den Baukonstruktionen und den Probelastungen beobachteten Erscheinungen zu verstehen, also auch die Einflüsse der Eigenschaften und der Zusammensetzung der Elemente, welche die Zementeisenkonstruktionen bilden. Für die einfache Berechnung muß man diese Verwicklung zu entwirren suchen, und um die Berechnungsgesetze aufzustellen, ist es umso logischer, nicht mit absoluter Strenge vorzugehen, als die Eigenschaften des Betons ebenso verschieden sind wie die Materialien und der Beton in sehr großem Maße von der sorgfältigen Mischung abhängig ist.

Es ist nur wichtig, genau die Fehler zu kennen, welche man freiwillig macht, um die Sache zu vereinfachen, und um die Fehlergrenzen zu bestimmen, muss man die Gesetze kennen, welche in den Zementeisenkonstruktionen herrschen.

Man kann sich beiläufig die Art und Weise, den Widerstand aus den Biegemomenten zu folgern, denken.

In den im „Génie civil“ und in den dem Kongress für Versuchsmethoden gemachten Mitteilungen haben wir gezeigt, daß die Kenntnis der Deformationskurven des auf Zug und Druck beanspruchten Betons genügt, um die Spannungen und Deformationen, welche die Biegemomente den Betoneisenkonstruktionen auferlegen, zu rechnen, wenn sie nachfolgende Bedingungen erfüllen:

Kontinuität des gezogenen Betons;

Nichtvorhandensein innerer Spannungen vor der Belastung;

Keine merklichen Störungen durch Scherkräfte.

Der raschen und überschlägigen algebraischen Rechnung, welche wir gezeigt haben, um die genaue Methode zu ersetzen, die an zeichnerischer Ungenauigkeit leidet, fehlt es an Eleganz und sie wird gewiss durch andere Ingenieure vervollständigt werden, aber sie giebt Resultate, die sicher erscheinen. Um inneren Spannungen Rechnung zu tragen, nämlich den Spannungen, die aus dem langsamen Erhärten an der Luft oder im Wasser hervorgehen, würde es genügen, die Resultate durch bestimmte Koeffizienten zu ergänzen, welche die Wirkung haben würden, die Deformationen und die einheitlichen Drücke des gepressten Betons etwas zu erhöhen, die Spannungen der Armaturen in den an der Luft bestehenden Bauwerken etwas zu verringern und das Gegenteil bei den im Wasser befindlichen Konstruktionen hervorzubringen.

Endlich wäre es sehr zweckmäßig für alle Konstruktionen an der Luft Risse vorauszusetzen und man würde daraus ersehen, in welchen Fällen man dies auch für die

Konstruktionen im Wasser tun müßte. Man würde so der Diskontinuität des Betons mittels Koeffizienten Rechnungstragen, welche die Zugspannungen der Armaturen und die Drücke des Betons tatsächlich erhöhen müßten. Was die Druckbeanspruchung des Betons betrifft, würde eine Erhöhung derselben umso wichtiger sein, je größer die Querschnitte der Armaturen im Vergleich zu ihren Umfängen sein würden. Demnach wäre das Verrücken der neutralen Achse für die Vermehrung der Zugspannungen der Armaturen von Schaden, aber in einem so geringen Maße, daß es nicht wert erscheint, diesem Rechnung zu tragen.

Das eine der Resultate dieses Studiums ist es, daß der Ingenieur, der die Heterogenität der Zementeisiskonstruktionen kennt, nach dem Gefühle die Gefahr schätzen und messen kann. Die Versuche über das Gleiten der Armaturen und über die Wirkungen der Risse setzen es außer Zweifel, daß die Zementeisiskonstruktionen umsomehr Garantie der Festigkeit und Dauer bieten, je schwächeren Querschnitt die Eiseneinlagen gegenüber ihren Umfängen haben und folglich je kleiner ihr Querschnitt ist. Aber es ist begreiflich, daß die große Vermehrung der Eiseneinlagen praktischen Schwierigkeiten begegnet und man muß wohl fürchten, daß vorspringende Winkel diesbezüglich besondere Übelstände bereiten würden. Es ist sehr schwer für jeden Fall, den richtigen Anteil von diesen einander widersprechenden Anforderungen herauszufinden.

Wir haben unsere Erkenntnisse und Meinungen der gegenwärtigen Staatskommission zur Kenntnis gebracht, aber wir sind von der außerordentlichen Schwierigkeit der Frage zu sehr überzeugt, um sie für beantwortet zu halten, und es ist sehr wahrscheinlich, daß wir infolge der Diskussionen, die hierüber gehalten werden, noch einiges zu ändern haben werden.



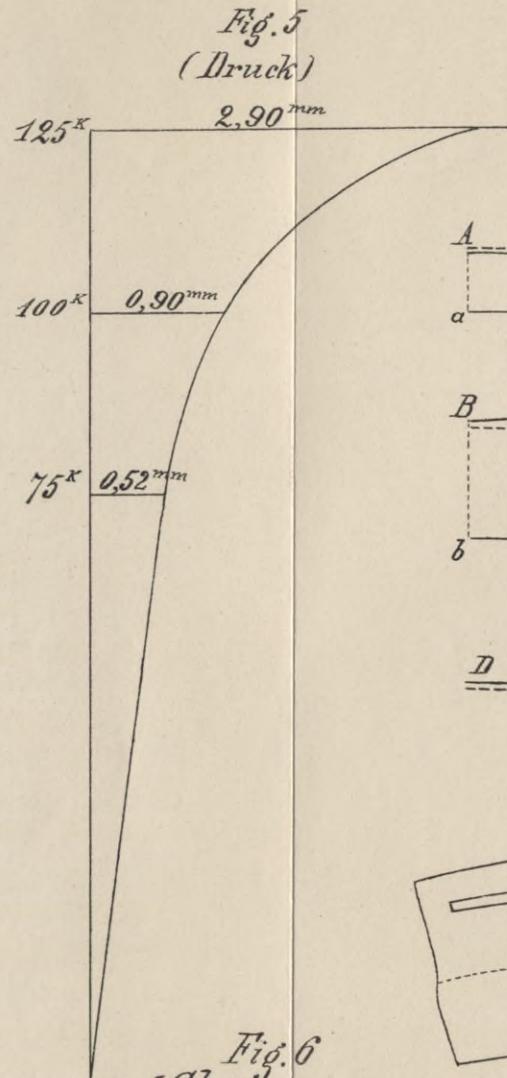
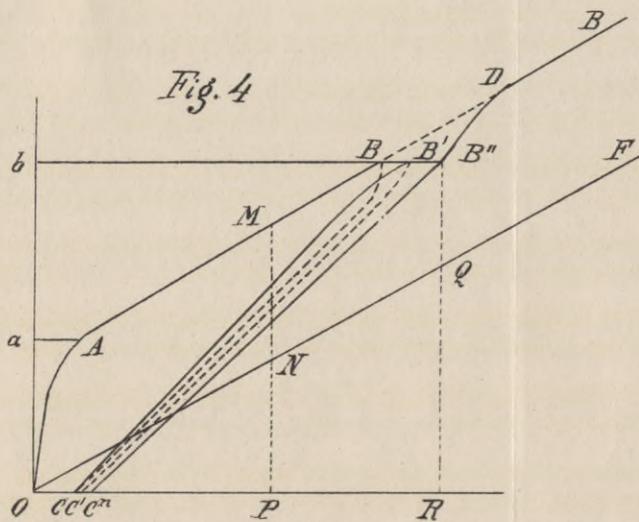
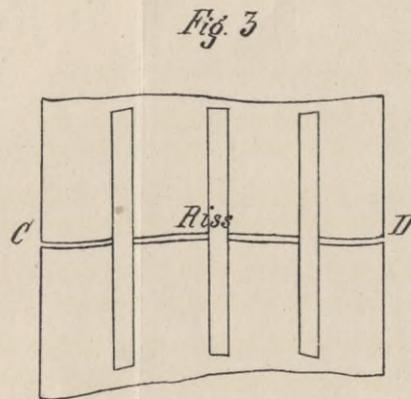
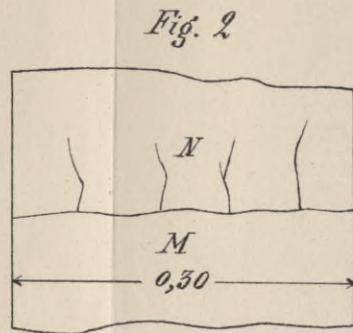
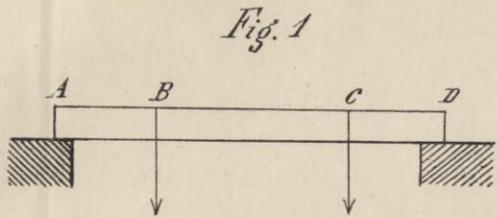


Fig. 7
(Risse.)

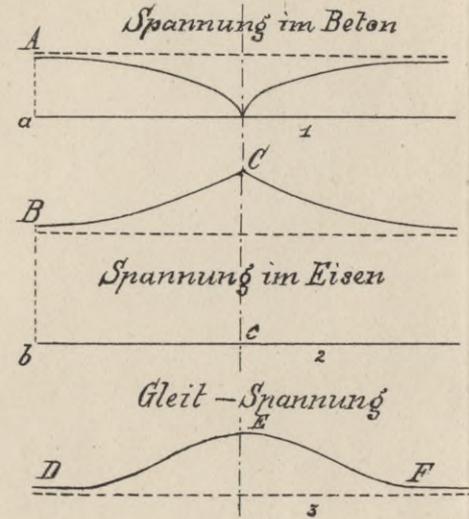
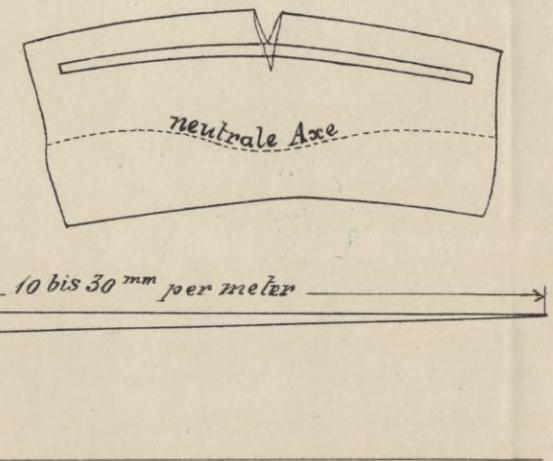


Fig. 6
(Gleiten)



S. 61

S.

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

II
L. inw. 32293

Kdn., Czapskich 4 — 678. 1. XII. 52. 10.000

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299743