

Der Ausschluss von Betonzugspannungen und die Verwendung hochwertigen Stahles durch das Freyssinet-Verfahren

Autor(en): **Mautner, K.W.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht**

Band (Jahr): **2 (1936)**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-2784>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

II b 1

Der Ausschluß von Betonzugspannungen und die Verwendung hochwertigen Stahles durch das Freyssinet-Verfahren.

L'élimination de la traction dans le béton et l'application de l'acier à haute résistance suivant la méthode Freyssinet.

The Elimination of Tension in Concrete, and the Use of High Tensile Steel by the Freyssinet Method.

Hon.Prof. Dr. Ing. K. W. Mautner,
(früher Technische Hochschule Aachen) Frankfurt a. M.

Die Erkenntnis über die Ursachen und das Ausmaß der Rissebildung im Eisenbeton ist weit fortgeschritten. Die Maßnahmen zur Verhütung der Rissebildung beziehen sich sowohl auf die Wahl geeigneter Baustoffe, wie auf das konstruktive Gebiet. Es ist bisher kaum anzunehmen, daß die Fortschritte in der Erzeugung zugfesterer Zemente einen wesentlichen Beitrag zu diesen Maßnahmen liefern werden. Ebenso ist die Wahl der Zuschlagstoffe, des Wasser-Zement-Faktors und der Nachbehandlung nur zum Teil Erfolg versprechend und nicht in allen Fällen durchführbar. Die Wahl besonders geformter Eiseneinlagen, wie sie in Verbindung mit der höheren Beanspruchung gewisser Stahlsorten üblich geworden sind (Isteg und andere Knoteneisen) bieten gewisse Verbesserungen bezüglich der Haftfestigkeit und damit eine Verringerung der Gefahr des Gleitens der Eisen und der hierdurch auftretenden stärkeren Risse. Dieser Vorteil wird zum größten Teil aber wieder aufgehoben durch die für diese Eisen zugelassenen höheren Beanspruchungen, welche von größeren als den normalen Betonzugspannungen begleitet sind. Die Tatsache, daß allein die unvermeidlichen Schwinderscheinungen bei der am häufigsten vorkommenden, außermittigen Lage der Eiseneinlagen im unbelasteten Zustande Zugspannungen hervorbringen, die rechnermäßig an die Grenze der Zugfestigkeit reichen, wird nur wenig durch die plastische Formänderung bei Zug gemildert. Diese plastische Formänderung kann, wie von anderer Seite dargetan wurde, nur dann bedeutend sein, wenn der Beton eine verhältnismäßig geringe Festigkeit aufweist. In diesem Falle ist auch wieder eine geringe Zugfestigkeit vorhanden.

Es scheinen hiernach die Verbesserungsmöglichkeiten durch die Wahl geeigneter Baustoffe an einer Grenze angelangt zu sein. Allgemein wird zwischen ungefährlichen und gefährlichen Rissen unterschieden, wobei die Rißöffnungen verschieden zwischen 0,2 und $\frac{2}{3}$ mm beurteilt werden. Grundsätzlich ist wohl zu sagen, daß die bei den zugelassenen Beton- und Eisenbeanspruchungen nicht

vermeidbaren Risse (zufolge der größten Bruchdehnung des Betons bei Biegung von etwa 0,3 mm/m) als nicht gefährlich anzusehen sind. Die Grenze der Harmlosigkeit und Gefährlichkeit ist jedoch sehr verwischt, je nach der Lage des Bauwerks und des Einflusses der Witterungsverhältnisse, und vor allem wegen des Einflusses wiederholter und stoßweiser Belastung.

Entsprechend dieser Tatsache enthalten die Bestimmungen der verschiedenen Länder doch wieder Begrenzungen der Zugspannungen, wenngleich man weiß, daß diese Begrenzungen wegen der nicht feststellbaren Anfangsspannungen nur bedingten Wert besitzen. So ist die Zugspannung nach der deutschen Bestimmung für Eisenbetonbrücken auf ein Fünftel der nachgewiesenen Würfel-druckfestigkeit begrenzt, was einer ähnlichen Bestimmung in den französischen Vorschriften vom Jahre 34 gleichkommt, die allerdings zunächst nur auf die schiefen Hauptzugspannungen Anwendung findet.

Es ist daher ein unverkennbarer Fortschritt, daß auf anderem, als den vorerwähnten Wegen ein sicherer Ausschluß jeder, auch der ungefährlichen Zugspannung möglich ist und innerhalb wirtschaftlicher Grenzen liegt. Die hierauf abzielenden Verfahren des Herrn *Freysinet*, die im Vorbericht wiedergegeben sind, verbinden folgende Vorzüge:

1. Sicherer Ausschluß aller Zugbeanspruchungen in den einer Biegung oder außermittigem Druck unterworfenen Bauteilen, daher auch Ausschluß jeder Rissegefahr.

2. Neben den zum Berichtsthema gehörigen Vorzügen der Rissesicherheit den weiteren Vorteil, daß die Ausnützung des gesamten Betonquerschnitts als Druckquerschnitt möglich ist, daß somit auf Biegung beanspruchte Bauteile mit ihrem vollen Querschnitt und Trägheitsmoment wirken und wie ein homogener Körper rechnerisch zu behandeln sind.

3. Die Tatsache, daß es hierdurch gelingt, bei gleichen Betondruckspannungen weitaus höhere Biegemomente aufzunehmen oder bei sodann zulässigen, bedeutend höheren Betondruckbeanspruchungen bedeutende Verringerung der Querschnittsabmessungen und somit des Aufwandes an Baustoffen zu erzielen.

4. Daß die Lastschwankung und der wiederholte Lastwechsel bezüglich der Rissegefahr so gut wie gar keine Rolle mehr spielt, und daß die Beanspruchungsschwankungen der Eiseneinlagen im Gegensatze zu der nach Stadium IIb berechneten Konstruktion ein Minimum ist.

Bekanntlich erreicht Herr *Freysinet* diese unwälzenden Vorteile der Eisenbetonkonstruktion vornehmlich durch Vorspannung sowohl der Längseiseneinlagen, wie etwaiger Bügel. Die Vorspannung von Eiseneinlagen ist lange bekannt. Die bisherigen Anwendungen, beispielsweise die von *Koenen* und *Lund*, scheiterten an zwei Umständen:

1. war die Vorspannung so niedrig bemessen, daß sie durch Schwinderscheinungen, plastische Verformung und Temperaturabfall bereits verloren ging,

2. war es keinem der genannten Ingenieure und den später mit dieser Aufgabe befaßten möglich, die entwurfsmäßigen Unterlagen für die Vorspannung so zu gestalten, daß sie die sichere Vorspannung gewährleisteten und die Ausführung in wirtschaftlichen Grenzen halten.

Auch Herr *Freyssinet* erreichte dieses Ziel nicht allein durch Verwirklichung des Gedankens der Vorspannung, sondern durch folgende, miteinander eng verbundene Maßnahmen:

1. Die Vorspannung sehr hoch zu wählen, und zwar etwa zwischen 4000 und 7000 kg/cm², durch Anwendung von Stählen von 8000 bis 12000 kg/cm² Streckgrenze.

2. Die Vorspanneinrichtung konstruktiv so zu wählen, daß die gleichmäßige Vorspannung aller Eiseneinlagen mit Sicherheit gewährleistet wird und die hierzu nötigen Verankerungen in solcher Art entweder mit den Schalungen oder mit dem Unterbau der Schalungen zu verbinden, daß sowohl die Vorspannung einwandfrei erfolgt, wie auch die Lösung der Spannvorrichtung mit einfachen Hilfsmitteln möglich ist.

3. Die erstgenannten beiden Bedingungen wären nicht erfüllbar, wenn nicht die Betonherstellung selbst in grundlegender Weise verbessert würde. Es wäre unwirtschaftlich und schwer durchführbar, so hohe Vorspannungen der Eisen lange Zeit bis zur Erhärtung des Betons und bis zur Möglichkeit der hohen Spannungsaufnahme aufrecht zu erhalten. Er hat daher Mittel ersonnen, welche es gestatten, Beton mittlerer und hoher Druckfestigkeit in einer bisher unerreicht kurzen Zeit herzustellen. Herr *Freyssinet* bezeichnet das Verfahren als „augenblickliche Erhärtung“ (endurcissement quasi instantané). Dieses Verfahren hat außerdem den Vorteil, daß es hiernach möglich ist, den Beton für Balken, Säulen, Pfähle, Rohre in kurzen Abschnitten stückweise (lamellenweise) zur Ausführung zu bringen, wodurch die Kosten für die verwickelte und teure Schalung auf einen Bruchteil beschränkt bleiben. Das Prinzip der sogenannten „augenblicklichen“ Erhärtung beruht, wie aus dem Vorbericht hervorgeht, auf der Behandlung des Betons durch Vibration, Druckverdichtung und Heizung. Die den einzelnen Vorgängen zukommende Bedeutung nach der physikalischen Seite ist im Vorbericht und in den Abhandlungen der I. V. B. H., Band IV genau behandelt. Es soll hier nur darauf hingewiesen werden, daß die Vibration die Ordnung der kleinen Zuschlagsteile mit Erzielung kleiner Hohlräume, die Druckverdichtung die starke, abermalige Verkleinerung dieser Hohlräume mit sich bringt, worauf erst nach diesen beiden Vorgängen die Heizung zulässig ist, weil die Kapillarkraft der Hohlräume, den Wasserentzug durch Verdampfung (Deshydratation) wirksam verhindert. Es ist dabei wohl zu beachten, daß jeder der drei Prozesse allein nicht das gewünschte Ergebnis liefert. So ist beispielsweise durch die Rüttelversuche von *Graf* und *Walz*, Stuttgart, bekannt, daß die Rüttelung bei plastischen und wasserreichen Mischungen, wie sie für Eisenbetonkonstruktionen in Betracht kommt, mit starkem Sandgehalt allein weder eine Verkürzung der Erhärtungszeit, noch eine Güteverbesserung mit sich bringt. Erst durch die Druckverdichtung werden die durch die Ordnung der kleinsten Teile geschaffenen geringen Hohlräume weiter verringert, und hierdurch die Heizung ermöglicht. Diese letztere aber verstärkt die innere Wärme beim Abbinden bekanntlich in starkem Maße. Die Wirkung dieses Verfahrens, das nicht nur laboratorienmäßig, sondern auch baustellenmäßig erprobt wurde, für Maste, Pfähle, Hohlpfähle, Druckrohre und Balkenkonstruktionen großen Ausmaßes, ist verschieden je nach der Querschnittsform. Gedrungene und geschlossene Querschnitte ergeben in kürzester Zeit Festigkeiten, welche die

28 Tage-Festigkeit normaler Eisenbetonkonstruktionen erreicht oder sogar wesentlich übertrifft. Bei anderen Querschnittsausbildungen, beispielsweise **I**-förmigen Balken, wird immerhin nach einer Frist von einigen Stunden nach der Ausschalung eine Anfangsfestigkeit von 150—200 kg/cm² erreicht, die genügt, um entweder mit der Anreihung eines weiteren Stückes fortzufahren, oder die Vorspannung auf den Beton zu übertragen.

Durch die Tatsache, daß sowohl Längszugspannungen gänzlich entfallen, und auch bei geeigneter Vorspannung der Bügel es leicht zu erreichen ist, daß die Hauptspannungen nur Druckspannungen sind, ist eine grundsätzlich andere Beurteilung der Frage der zulässigen Betondruckspannung am Platze.

Die zulässige Betondruckspannung wird mit Recht in der gebräuchlichen Eisenbetonkonstruktion (Rechnungsannahme gerissene Zugzone) mit einem höheren Sicherheitsbeiwert bemessen als die Eisenbeanspruchung hinsichtlich der Erreichung der Streckgrenze. Dieser in der Regel bedeutend höhere Sicherheitsgrad der zulässigen Betondruckbeanspruchung hat aber nicht allein seine Ursache in der mehr den Zufälligkeiten unterworfenen Herstellung des Betons gegenüber der Eisenherstellung im Hüttenprozeß, als vielmehr in der Frage der Rissesicherheit. Bei bedeutender Steigerung der Betondruckspannung erhöht sich auch die rechnermäßige Betonzugspannung und es wird damit die Einhaltung unschädlicher Risse erschwert. Außerdem ist mit der Vergrößerung der Betondruckspannung bei Plattenbalken-Querschnitten gewöhnlich eine derartige Häufung der Eiseneinlagen verbunden, daß auch diese wegen der Rissegefahr zu Bedenken Anlaß gibt. Diese beiden Sicherheitskomponenten für die Bemessung der Betondruckspannungen fallen bei Anwendung des *Freyssinet*-Verfahrens fort, und es verbleibt nur die Forderung, dem Beton einen etwas höheren Sicherheitsbeiwert zu geben als dem Eisen gegenüber der Streckgrenze, begründet in seiner Herstellungsart, nicht aber der Grund des konstruktiven Einflusses der erhöhten Betondruckspannung. Es ist daher unbedenklich, als zulässige Betondruckspannung etwa $\frac{1}{3}$ der 28 Tage-Würfelfestigkeit zu wählen, sodaß bei Anwendung der *Freyssinet*schen Herstellungsmethode Betondruckspannungen von 150 kg/cm², auch für ungünstige Fälle, als ohne weiteres zulässig angesehen werden können.

Was den Wechsel der Eisenspannungen für Nutzlast, insbesondere rollende Last anbelangt, so ist zu beachten, daß der ganze Querschnitt bei der Lage der Null-Linie, etwa an der Balkenunterkante, mitwirkt und daher die Eisenspannungsschwankung nur $n \cdot$ Betonspannungsschwankung ist. Diese beträgt nur einen verhältnismäßig ganz geringen Bruchteil gegenüber der Anfangsspannung, im Gegensatz zur gerissenen Eisenbetonkonstruktion.

Die bisherige Verwendung von Stählen hoher Streckgrenze ohne Vorspannung hat bekanntlich wohl eine Erhöhung der Bruchsicherheit, aber keine Erhöhung der Rissesicherheit mit sich gebracht, es sei denn die günstige Wirkung der Drall- und Knotenstäbe bezüglich der Haftfestigkeit und Verteilung der Risse. Die erhöhte Eisenbeanspruchung solcher Stahlsorten und die hierdurch bedingte Verlängerung erhöhen die Gefahr der Rissebildung im Gegensatz zu den vorbeschriebenen Wirkungen. Beim Verfahren *Freyssinet* spielt der hochwertige Stahl, der vorgespannt wird, nicht mehr die Rolle einer Bewehrung im Sinne der Eisenbetonberechnung. Er dient lediglich dazu, die starke, außermittige Vor-

spannung zu erteilen und beeinflußt im Gegensatze zu den nicht vorgespannten hochwertigen Stählen die Rissegefahr im Sinne der Verhütung der Risse. Daher fallen alle die Gründe, die gegen die Verwendung hochwertiger Stähle sprechen, in diesem Falle weg, bis auf die Einwendungen, die gegen die Verwendung kaltgereckter Stähle im einzelnen erhoben wurden. Diese Befürchtung ist leicht zu beseitigen durch den Umstand, daß diese Qualitätsstähle auch ohne Kaltreckung durch entsprechende Legierungen erzeugt und bezogen werden können. Zufolge der hohen Eisenbeanspruchung ist die Verwendung außergewöhnlich starker Durchmesser nicht nötig, sodaß die Verankerung durch übliche Haken ohne jede Gefahr ist.

Die Anwendung des Verfahrens bezieht sich auf eine große Anzahl von Baukonstruktionen. Bisher sind die bekannten Hohlpfähle beinahe unbegrenzter Länge nach diesem Verfahren ausgeführt worden, worüber Herr *Freyssinet* im Schrifttum¹ berichtet hat (Wiederherstellung des Überseebahnhofs in Le Havre). Ferner ist seit Jahren die Herstellung dünnwandiger Hochspannungsmaste für Fernkraftübertragung im Gange. In letzter Zeit sind zwei Verfahren laboratoriums- und baumäßig entwickelt worden, die besondere Aufmerksamkeit verdienen. Das sind:

1. Die Herstellung von weitgespannten Balken, und
2. die Herstellung von Hochdruckrohren großer Durchmesser mit hohen Betriebs- und Prüfdrücken.

Über die konstruktiven Hilfsmittel zur Erzeugung der Vorspannung und der Güteeigenschaften des sofort erhärtenden Betons (*endurcissement quasi instantané*) ausführlich zu berichten, ist hier weder Zeit noch Gelegenheit. Dies soll späteren Ausführungen vorbehalten bleiben. Lediglich als das Grundsätzliche dieser Hilfsmittel sei angeführt: Die Vorspannung erfolgt entweder mit Zuhilfenahme der Schalform selbst, oder eines Unterbaues dieser, in der Regel mit hydraulischen Pressen. Im Gegensatze zu den bisherigen Versuchen anderer Forscher können Vorspannkkräfte von 1000 t und mehr sicher hervorgerufen werden. Ein weiteres, besonders interessantes Hilfsmittel ist aber *die Vorspannung der Eiseneinlagen durch den Beton selbst*. Von diesem ganz neuartigen Hilfsmittel wird wiederholt Gebrauch gemacht. Der zunächst schwer verständliche Gedanke, den Beton selbst zur Vorspannung der Eiseneinlagen zu benützen, erklärt sich aus den großen Scher- und Druckwiderständen flüssig eingebrachten und systematisch entwässerten Betons, der allseitig starkem Druck unterworfen wird. Der Druck wird hierbei in der Regel ausgeübt durch aufblähbare, dichte Hüllen (Kautschuk), die in Verbindung mit der Schalung stehen. Die theoretische Begründung dieses in der Praxis mit großem Erfolg durchgeführten Verfahrens kann erbracht werden, wie dies *Freyssinet* mit Benützung der neuen Betrachtungen von *Caquot* (*Equilibre des Massifs à frottement interne*. *Caquot*, Paris 1934) getan hat.

Im Nachfolgenden wird eine kurze Übersicht über die Beanspruchungsverhältnisse weitgespannter Balken gegeben. Bei dieser Gelegenheit wird an die Aussprache zum Thema „Weitgespannte Balkenbrücken“ auf dem Kongreß in Paris 1932 erinnert, in welchem die Grenze der wirtschaftlich und gestalterisch er-

¹ So auch im Vorbericht des Kongresses.

Die größte Betonbeanspruchung aus Eigengewicht + größter Nutzlast + Belastungsgerüst beträgt (Fig. 2)

- im Obergurt 143,7 kg/cm² Druck
- im Untergurt 18,9 kg/cm² Druck.

Die Null-Linie liegt also unter Balken-Unterkante. Bei einer Vorspannung von nur 3500 kg/cm² beträgt die Obergurtspannung 160 kg/cm² und die Untergurtspannung 40 kg Zug. Bei einer Vorspannung von etwa 5000 kg/cm² ist die Untergurtspannung an der Unterkante Trägergerade noch 0. Aus der Vorspannung allein, ohne Eigengewicht, ergäbe sich eine Untergurtspannung von 205 kg/cm².

Der Träger hat im Mittelschnitt 1008 cm² Querschnitt und besitzt im Untergurt 64 Rund-eisen 5,4 mm \varnothing , die somit die Verkleinerung der bei der Hauptausführung zu wählenden Durchmesser 16 mm sind. Der Balken wurde, wie oben erwähnt, lamellenweise (stückweise) hergestellt, derart, daß insgesamt 12 Stücke der Länge nach aneinandergereiht wurden. Die Herstellung eines solchen Stückes und seine Erhärtung erfordert wenige Stunden. Zwischen den einzelnen Lamellen haben sich vor der Spannungsübertragung der Vorspannung auf den Beton an den lotrechten Lamellengrenzen Schwindrisse gezeigt, deren Größe zu etwa $\frac{1}{20}$ mm geschätzt werden konnte. Nach der Übertragung der Vorspannung schlossen sich diese Schwindrisse so, daß sie mit dem freien Auge in keiner Weise mehr zu erkennen waren. Hierbei blätterte der zu Meßzwecken angebrachte Kalkanstrich sichtbar ab. Von der Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart wurden Dehnungsmessungen in den Gurten in der Richtung der Hauptspannungen und in der Winkelhalbierenden zwischen den Hauptspannungen und den Achsen vorgenommen. Diese Messungen ergaben für alle Hauptspannungen Druck. Es ist daher folgendes festzustellen (Fig. 3):

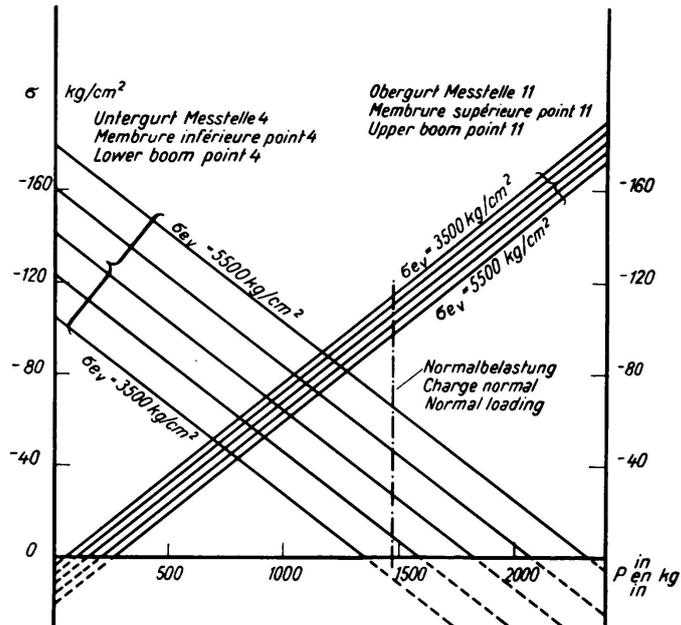


Fig. 2.
Mittel-Schnitt.

erfordert wenige Stunden. Zwischen den einzelnen Lamellen haben sich vor der Spannungsübertragung der Vorspannung auf den Beton an den lotrechten Lamellengrenzen Schwindrisse gezeigt, deren Größe zu etwa $\frac{1}{20}$ mm geschätzt werden konnte. Nach der Übertragung der Vorspannung schlossen sich diese Schwindrisse so, daß sie mit dem freien Auge in keiner Weise mehr zu erkennen waren. Hierbei blätterte der zu Meßzwecken angebrachte Kalkanstrich sichtbar ab. Von der Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart wurden Dehnungsmessungen in den Gurten in der Richtung der Hauptspannungen und in der Winkelhalbierenden zwischen den Hauptspannungen und den Achsen vorgenommen. Diese Messungen ergaben für alle Hauptspannungen Druck. Es ist daher folgendes festzustellen (Fig. 3):

Der Träger hat sich unter der Vollbelastung bei 5,500 kg/cm² Vorspannung wie ein homogener Träger verhalten, wobei für die Biegung das ganze Trägheitsmoment des Querschnitts mitwirkte. Zugspannungen treten weder im Untergurt noch in den Hauptspannungsrichtungen, noch in einer hiervon abweichenden Richtung auf. Die Durchbiegung des Trägers ist zufolge des großen Trägheitsmomentes verhältnismäßig sehr klein und beträgt 1 : 750. Sie entspricht einem Eisenkonstruktionsträger gleicher Querschnittsform, welcher nur mit 500 kg/cm² beansprucht war.

Die Erklärung dieser außerordentlich günstigen Spannungsverteilung liegt in der Vorspannung der Längseisen und der Bügel. Bekanntlich sind bei Anwesenheit von Spannungen σ_x und σ_y nach dem ebenen Problem die Hauptspannungen gegeben durch:

$$\sigma_{I, II} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2}; \quad \text{tg } 2\varphi = \frac{2\tau}{\sigma_y - \sigma_x}$$

Bei normalen Eisenbetonkonstruktionen ist in der neutralen Achse $\sigma_x = \sigma_y = 0$. Daher ergibt sich die schiefe Hauptzugspannung $\sigma_{II} = -\tau$ und ist unter $\varphi = 45^\circ$ geneigt. Es ist klar, daß allein durch die Einwirkung einer Normal-

spannung σ_x (Vorspannungsdruck) die Hauptzugspannung sich vermindert. Zeichnet man den Mohrschen Spannungskreis s. Fig. 4 etwa für $\sigma_x = \tau$, so erhält man nur mehr eine Hauptzugspannung von

$$\sigma_{II} = \frac{\tau}{2}(1 - \sqrt{5}) = -0,618 \tau$$

Wählt man $\sigma_x = 2\tau$, so ergibt sich die größte Hauptzugspannung $\sigma'_{II} = -0,414\tau$. Fügt man endlich zu $\sigma_x = \tau$ eine lotrechte Vorspannung (durch Bügel) $\sigma_y = \tau$ hinzu, so ergibt sich die Hauptzugspannung $\sigma''_{II} = 0$, und die Hauptdruckspannung $\sigma''_I = 2\tau$. Dieser Zustand kann durch die Bügelvorspannung leicht erreicht werden, und ist im vorliegenden Falle übertroffen worden. Die Zugspannung scheidet für die Schubbeanspruchung überhaupt aus und die Schubspannung kann bis zur Hälfte der zulässigen Druckspannung getrieben werden.

Bei den vorgenannten Betonbeanspruchungen von rd. 145 kg/cm^2 auf Druck trägt der Träger an Nutzlast das Siebenfache seines Eigengewichtes.

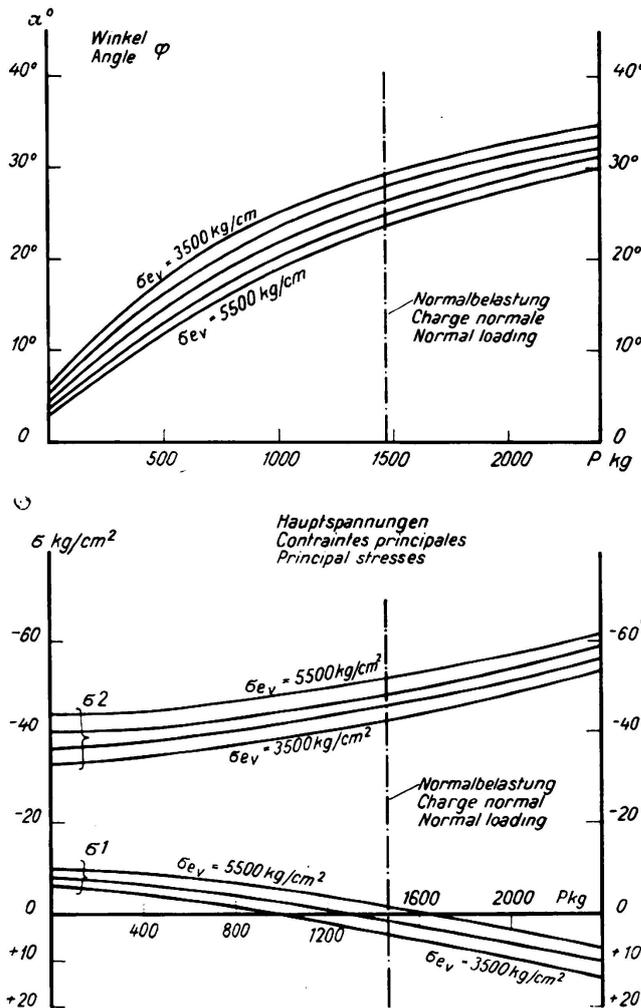


Fig. 3.
Schnitt 1—14.

Für den wirklich auszuführenden Träger ergibt sich eine mittlere Querschnittsfläche von $0,84 \text{ m}^2$. Das Gesamt-Mittelmoment beträgt ca. 2000 mt und das Verhältnis des Nutzlastmomentes zum Eigengewichtsmoment etwa $1,2$. Vergleicht man diese mit vollwandigen Balkenträgern noch nicht erreichte freie Stützweite mit Balken ausgeführter Brücken, so ersieht man das überaus günstige Verhältnis von Nutzlast zu Eigengewichtsmoment.

Ein Balkenträger von 100 m Spannweite mit denselben Beanspruchungen hätte ein mittleres Eigengewicht von 5 t/m und ist befähigt, eine Nutzlast von 3 t/m zu tragen. Dabei sind die zulässigen Druckbeanspruchungen nach dem Vorangeführten noch mäßig klein gehalten.

Nach demselben Verfahren ausgeführte Hochdruckrohre, bei welchen die Vorspannung der Eiseneinlagen, wie oben erwähnt, durch den allseitig umschlossenen druckverdichtenden Beton durch Vermehrung des Innendruckes selbst erfolgte, hatte folgendes Ergebnis:

Kleine Versuchsrohre von 440 mm innerem Durchmesser und 37 mm Wandstärke waren einem Prüfdruck bis 90 at ausgesetzt worden, ohne daß erkennbarer Wasserverlust eintrat. Hingegen hat ein Rohr gleicher Abmessung, gleicher Bewehrung ohne Vorspannung nicht mehr als 6 at vor Eintritt der Undichtigkeit bestanden. Besonders bemerkenswert ist der Umstand, daß das nicht gefüllte Rohr unter der Wirkung der Vorspannung im Augenblick seiner Entformung 550 kg/cm^2 Druck auszuhalten hatte, und dies wenige Stunden nach Beginn der Fabrikation.

Dasselbe Prinzip wurde nun baumäßig auf Hochdruckrohre großen Durchmessers übertragen, die nunmehr in dauernder Fabrikation sind. So sind beispielsweise Rohre von 800 mm \varnothing bis 16 at Prüfdruck bei 5 cm Wandstärke einwandfrei hergestellt worden, wobei die Entformung wenige Stunden nach Beginn des Herstellungsvorganges vorgenommen wurde. Hierbei erleidet der Beton beim Entformen eine Druckbeanspruchung von 140 kg/cm^2 , etwa 3 Stunden nach dem Einbringen. Besonders bemerkenswert ist die Tatsache, daß solche Rohre, welche absichtlich einem höheren Überdruck als dem normalen Prüfdruck ausgesetzt wurden, und bereits schweißten, nach dem Druckabfall und Wiedererhöhung des Druckes bis zum zulässigen Druck sich vollkommen dicht erwiesen. Durch die Vorspannung werden also die aufgetretenen statischen Risse in vollkommener Art wieder zusammenschweißst. Dies hat für Stoßbelastungen (Wasserschläge) große Bedeutung.

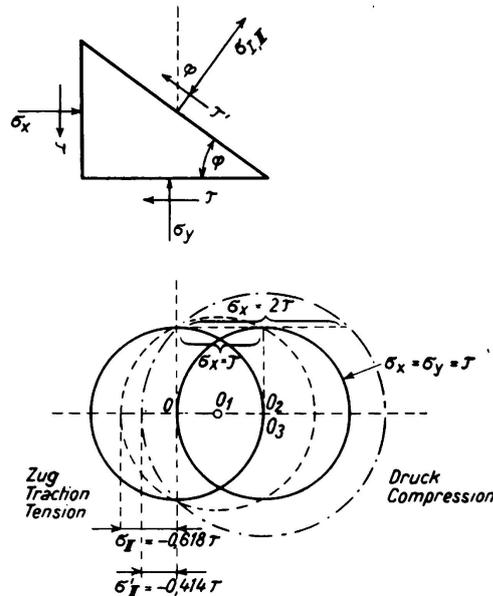


Fig. 4.