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

Band: 2 (1936)

Artikel: Praktische Weiterentwicklung der Verfahren zur mechanischen Behandlung von Beton

Autor: Freyssinet, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-2683

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

IIb 3

Praktische Weiterentwicklung der Verfahren zur mechanischen Behandlung von Beton[1].

Progrès pratiques des méthodes de traitement mécanique des bétons.

Practical Improvements in the Mechanical Treatment of Congrete.

E. Freyssinet,
Ingénieur-Conseil, Neuilly-s-Seine.

Ich werde jetzt zeigen, daß die in den beiden ersten Teilen dieser Abhandlung angestellten Überlegungen eine große Bedeutung haben, nicht nur vom theoretischen Gesichtspunkt aus, sondern auch und vor allem vom Standpunkt der Bauausführung.

Diese theoretischen Betrachtungen haben mich zur Verwirklichung vollkommen neuer und in der Tat wirklich umwälzender Bedingungen der Vereinigung Eisen-Beton geführt, die nicht allein gestatten, die Preise und die Gewichte einer Konstruktion von gegebenen Abmessungen und gegebener Tragfähigkeit erheblich herabzusetzen, sondern auch neue technische Möglichkeiten bieten, die das größte Interesse verdienen. Diese Ergebnisse können durch die Anwendung von Stahl mit hoher Streckgrenze und von hochwertigem Beton erreicht werden.

Schwierigkeiten der Ausnutzung von Stahl mit hoher Streckgrenze.

Um den Preis des für eine Konstruktion gegebener Abmessungen und Tragfähigkeit benötigten Stahles zu senken, muß man das Verhältnis $\frac{\text{Preis je kg}}{\text{zulässige Spannung}}$ senken, das sich wie das Verhältnis $\frac{\text{Preis je kg}}{\text{Streckgrenze}}$ ändert.

[1] Diese Untersuchung von *Freyssinet* ist ein Teil einer Arbeit über „Neue Probleme des Eisenbetonbaues". Die beiden ersten Teile dieses Berichtes, von denen nachstehend eine kurze Inhaltsangabe gegeben wird, sind in dem 4. Band der „Abhandlungen" der Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau erschienen.

Im ersten Teil seiner Arbeit entwickelt *Freyssinet* eine Theorie der Formänderungen von Zement und Beton, die sich auf die Grundsätze der Thermodynamik und physikalische Annahmen stützt. Es handelt sich um eine Folge von Lehrsätzen, die für alle Körper gilt, die er „pseudo-solide" nennt. Darunter sind Körper zu verstehen, die mit sehr kleinen Hohlräumen durchsetzt sind, die von einer Flüssigkeit, welche deren Wandungen benetzt, oder von einem Glas ausgefüllt werden können.

Im zweiten Teil erörtert der Verfasser die allgemeinen Eigenschaften der Zemente und die Bildung des Porennetzes der Zementpasten, wobei er von neuen Annahmen ausgeht. Er leitet hieraus wichtige praktische Schlußfolgerungen ab und erklärt insbesondere, warum die Widerstandsfähigkeit der Zemente mehr als von irgendeinem anderen Faktor von den mechanischen und physikalischen Bedingungen ihrer Anwendung abhängt. Er zeigt dann, daß man für alle Zemente bedeutende, fast augenblickliche Erhärtungen durch einfache Verbesserungen der Dichtigkeit erreichen kann.

Die Hüttenwerke liefern Stahl mit Festigkeiten in der Nähe von 100 kg/mm², deren Streckgrenze leicht über 80 kg/mm² gebracht werden kann, zu einem Preis, der nur wenig höher ist als jener des üblicherweise gebrauchten Betoneisens. Bei bedeutender Nachfrage könnten sie Sonderstähle mit einer Streckgrenze, die wesentlich höher als 120 kg/mm² ist, zu Preisen gleicher Größenordnung liefern.

Da man heute fast ausschließlich Eisen mit einer Streckgrenze von 24 kg/mm² verwendet, kann man also das Verhältnis $\frac{\text{Preis je kg}}{\text{Streckgrenze}}$ durch einen Koeffizienten teilen, der gegenwärtig bei 3 liegt und der sich künftig bis über 4 erhöhen dürfte. Bei großen Spannweiten wird sich dieser Koeffizient durch die Verringerung der Eigengewichte noch weiter erhöhen.

Wenn man in einem Bauteil das gewöhnliche Eisen durch hochwertigen Stahl ersetzt, z. B. durch Stahl mit einer Streckgrenze von 120 kg/mm², so ruft man in ihm unheilvolle Risse hervor, sobald man ihn Belastungen unterwirft, die über die üblichen Werte wesentlich hinausgehende Spannungen erzeugen. Der Bauteil verhält sich dann nicht viel besser als ein solcher mit Einlagen aus gewöhnlichem Rundeisen gleichen Querschnittes.

Der Grund für diesen Mißerfolg ist, daß die Längenänderung des Betons in üblich bewehrten Konstruktionen praktisch gleich der der Eisen ist, die die gesamten Zugspannungen aufnehmen. Die Längenänderung wächst proportional mit den Spannungen. Der Young-Modul ist unabhängig von der Art des verwendeten Eisens.

Es ergibt sich, daß die zulässigen Längenänderungen für den Beton ungefähr den für weiches Eisen zulässigen Spannungen entsprechen.

Die Verwendung von hochwertigem Stahl, der auf Zug beansprucht ist, erhöht also nur wenig den praktischen Wert einer Konstruktion, und da sie in der Praxis gewisse Unbequemlichkeiten mit sich bringt, wird auf sie verzichtet.[2]

Schwierigkeiten der Ausnutzung von Beton hoher Festigkeit.

Ich habe erklärt, wie die Verbesserung der Dichtigkeit des Betons durch mechanische Mittel es gestattet, dessen Druckfestigkeit so weit zu steigern, daß sie fast jener der Gesteine gleicht, deren Bruchstücke die Zuschlagstoffe bilden.

Da man in den Steinbrüchen leicht Zuschlagstoffe findet, deren Gesteinsfestigkeit 1000—1500 kg/cm² und mehr beträgt, ergibt sich, daß die tatsächlichen Werte des Verhältnisses

$$\frac{\text{Preis je m}^3}{\text{Druckfestigkeit}}$$

ungefähr im gleichen Ausmaß wie diejenigen des Verhältnisses

$$\frac{\text{Preis je kg}}{\text{Streckgrenze des Eisens}}$$

verringert werden können.

[2] Ich erinnere daran, daß aus meinen Arbeiten über die Formänderungen von Beton hervorgeht, daß im Gegensatz hierzu die Anwendung von harten Eisen in gedrückten Bauteilen sehr zu empfehlen und sehr wirksam ist.

Ich bemerke nebenbei, daß für hochwertigen Beton das Verhältnis

$$\frac{\text{Elastizitätsgrenze}}{\text{Spezifisches Gewicht}}$$

wesentlich höher ist als das der üblichen Eisen und sich dem der besten Flugzeugmetalle nähert, vor allem wenn man beim Vergleich den Zusammensetzungsschwierigkeiten Rechnung trägt, die im Fall des Betons nicht bestehen.

Aber diese Eigenschaften des Preises und des geringen spezifischen Gewichtes sind in der klassischen Eisen-Beton-Verbindung äußerst schlecht ausgenützt.

Indem man die Dichtigkeit des Betons erhöht, erhöht man seine Druckfestigkeit, dagegen seine Zugfestigkeit im allgemeinen in einem viel geringeren Ausmaß und in Abhängigkeit von den Herstellungsbedingungen. Hieraus ergibt sich erstens, daß man den Wert des Verhältnisses $n = \frac{E_a}{E_b}$ herabsetzt, wodurch sich die neutrale Faser nach oben verschiebt und die Druckspannung in auf Biegung beanspruchten Bauteilen erhöht wird. Der erwartete Vorteil wird also stark verringert.

Zweitens ist die Zugfestigkeit mindestens ebenso wichtig wie die Druckfestigkeit, denn das Verhalten der Konstruktionen gegenüber Schubbeanspruchungen und zahlreichen Zerstörungsursachen, die man in der Berechnung vernachlässigen kann, denen die Praxis aber Rechnung tragen muß, hängt ausschließlich von ihr ab. Die Konstrukteure drücken das so aus, daß sie sagen, die Praxis verlangt geringste Abmessungen.

Drittens erfährt jedwede Konstruktion, ganz gleich welcher Art, nach *Caquot* dauernde Anpassungs-Formänderungen, deren Folge eine Angleichung der Spannungen und eine Verminderung ihrer Höchstwerte ist. Diese Anpassung vollzieht sich schlecht, wenn der Beton zu wenig plastisch verformbar ist.

Die Einführung von Beton hoher Dichtigkeit bei üblichen Konstruktionen bietet aus diesen verschiedenen Gründen erheblich geringere Vorteile, als man erwarten dürfte, wenn man allein nach der Druckfestigkeit urteilt.

Theoretische Bedingungen der vollständigen Ausnutzung der Güteeigenschaften von hochwertigem Beton und hochwertigem Stahl.

Begriff der Vorspannung.

Eine gute Ausnutzung hochwertiger Baustoffe ist somit abhängig beim Stahl davon, daß die Dehnung des Betons innerhalb seiner üblichen praktischen Grenzen bleibt, beim Beton davon, daß die gesamten Zugspannungen unterhalb einer Grenze bleiben, die wesentlich geringer ist als die Zugfestigkeit des Betons.

Dieser doppelten Forderung kann man theoretisch genügen, indem man den Stahl nicht zur Aufnahme von Zugkräften benutzt, unter denen er eine Dehnung erfährt, der der Beton nicht zu folgen vermag, sondern um im Beton dauernde Spannungen hervorzurufen, die denen entgegengesetzt gerichtet sind, die durch die Belastung hervorgerufen werden, also Druckspannungen in den auf Zug, dagegen Zugspannungen in den auf Druck beanspruchten Zonen.

Man kann dieses Ergebnis erzielen, indem man den Stahl vor dem Einbringen

des Betons auf Zug beansprucht. Zu diesem Zweck faßt man die Eiseneinlagen in der Nähe ihrer Enden durch zwei vorübergehende Verankerungen, die es gestatten, sie mittels Pressen, die sich gegen Widerlager abstützen, um ein bekanntes Maß zu dehnen. Wenn der Beton soweit erhärtet ist, daß er die Verankerung der Enden der Bewehrung übernehmen kann, wird die Einwirkung der Pressen aufgehoben. Die Eiseneinlage hat nun die Neigung, sich zu verkürzen, und übt dabei auf den Beton eine Druckkraft aus, die ihrer Zugkraft entspricht. Ein anderes Verfahren besteht darin, daß man in den Zugeisen eine Zugkraft hervorruft, indem man sie gegen bereits erhärteten Beton verspannt.

Auf diese Weise erzeugt man in dem System Eisen-Beton ein doppeltes System ständiger Spannungen, die gleich aber entgegengesetzt denen sind, die in gewöhnlichen bewehrten Bauteilen durch die Schwindneigung hervorgerufen werden, deren unangenehme Folgen bekannt sind. Das Hervorrufen von Vorspannungen hat also zur ersten natürlichen Folge, die schädlichen Einflüsse des Schwindens zum Verschwinden zu bringen. Um dieses Ziel zu erreichen, hat man schon sehr lange und in verschiedenen Ländern nach praktischen Ausführungsverfahren gesucht. Aber alle diese Versuche haben fehlgeschlagen und wurden wieder aufgegeben, mit Ausnahme gewisser Anwendungen bei der Umschnürung von Rohren.

Ursachen des Mißerfolges der ersten Versuche. Unbedingte Notwendigkeit der Verwendung von Stahl mit sehr hoher Streckgrenze in Verbindung mit sehr dichtem Beton, um bleibende Vorspannungen zu erhalten.

Eine der Ursachen der Mißerfolge vor meinen Untersuchungen war, daß man die Gesetze der Formänderung des Betons nicht kannte.

Man nahm an, daß im Eisen Zugspannungen von einigen kg/mm² genügen müßten, um die Schwindwirkung auszugleichen.

Andererseits arbeitete man mit Beton mit sehr hohem Wasserzementfaktor (dem einzigen, den man praktisch herzustellen wußte), der für alle Ursachen der Formänderung sehr empfindlich ist und sich unter dem gemeinsamen Einfluß der Anfangsspannung und der ununterbrochenen Schwankungen des Feuchtigkeitszustandes um eine Gesamtmenge verkürzt, die viel größer als die den Eisen gegebene Dehnung ist. Daraus ergibt sich die, besonders von dem Deutschen *Koenen* gezogene Schlußfolgerung, daß es unmöglich sei, bleibende Vorspannungen zu erzielen.

Wir wissen heute, daß die gesamten Formänderungen des Betons, wenn sie auch viel größer sind, als man früher vermutete, doch ihre Grenzen haben. Alle Versuche bestätigen, daß die Gesetze der Verkürzungen unter Belastung durch Kurven dargestellt werden können, die asymptotisch zu Parallelen zur Zeitachse verlaufen, deren Ordinate vor allem vom Wasserzementfaktor abhängt, den der Beton bei Beginn des Abbindens hat. Gibt man daher den Eisen eine so große Dehnung, daß die größte Verkürzung des Betons nur ein geringer Bruchteil dieser Dehnung ist, so erhält man Vorspannungen, deren größter Teil bleibend ist und mit denen man, selbst nach sehr langer Zeit, unbedingt rechnen kann.

Die Verkürzungen können für gewöhnlichen Beton, je nach den Schwind- oder Belastungsbedingungen, bis drei Tausendstel und sogar mehr erreichen, wodurch

ein Spannungsabfall in den Eisen verursacht wird, der 60 kg/mm² überschreiten kann. Man darf also nicht überrascht sein, daß Spannungen von 10—12 kg negative Ergebnisse gebracht haben.

Die Verwendung von sehr dichtem Beton verringert erheblich die Formänderungen und den durch sie bedingten Spannungsabfall. Dieser ist von Bedeutung und muß nach den besonderen Verhältnissen (einwirkende Belastung, mechanische Eigenschaften sofortiger und allmählich sich einstellender Art, mittlere Feuchtigkeitsbedingungen) in jedem Fall berücksichtigt werden. Er bewegt sich im allgemeinen zwischen 10 und 30 kg/mm², wobei der letztgenannte Wert nur bei einem Druck der Größenordnung von 200—300 kg/cm² erreicht wird.

Ich benutze im allgemeinen Anfangsspannungen, die so berechnet sind, daß Dauerspannungen erhalten werden, welche zwischen $^1/_2$ und $^2/_3$ der Streckgrenze des Stahls liegen, die in den bisherigen Anwendungsfällen zwischen 80 und 90 kg/mm² lag.

Untersuchung der Änderungen des mechanischen Zustandes durch Vorspannungen in Bauteilen, die Biegungsspannungen in einer Richtung unterworfen sind.

a) Stabilisierung der Formänderungen von Eisen und Beton in Bauteilen, die durch wechselnde Lasten beansprucht sind.

Bei gleichgerichteten Momenten muß man dem auf Zug beanspruchten Beton eine bleibende Vordruckspannung geben, die der Größe des Zuges entspricht, im allgemeinen aber etwas größer sein muß. Der Beton bleibt dann nach Aufbringung der Belastung gedrückt.

Seine Formänderungen bei wechselnder Last werden durch das Trägheitsmoment des gesamten Querschnitts, einschließlich der Eisen, bestimmt. Beim gewöhnlichen Eisenbeton werden sie nur durch das Trägheitsmoment der Druckzone bestimmt, die der Eisenbewehrung entspricht.

Da dieses nur ein Bruchteil des ersteren ist, ist die erste Wirkung der Vorspannungen die Verminderung der Formänderungen der Zugzone in einem Verhältnis, das im Vergleich zum üblichen Eisenbeton oft 5 : 1 erreicht.

Dem Beton wird nicht nur jede Möglichkeit der Rißbildung entzogen, sondern es schwanken auch die Spannungen in den Eisen entsprechend ihrer mit dem Beton gleichen Formänderung viel weniger als im gewöhnlichen Eisenbeton.

b) Verringerung der Druckspannungen des Betons im Vergleich mit dem üblichen Eisenbeton.

In den Eisenbetonbauteilen ist die Steigung der Nullinie über die Schwerpunktslinie dadurch bedingt, daß die elastische Dehnung der Eisen größer ist als die elastische Verkürzung des Betons. Dadurch erhöhen sich sehr wesentlich die Höchstdruckspannungen im Vergleich zu einem homogenen Körper gleicher Abmessungen, und zwar umso mehr, je dichter der Beton ist und je höhere Zugspannungen die Eiseneinlagen haben.

In Bauteilen mit Vorspannung dagegen wird die neutrale Achse unabhängig von der Dichte des Betons unter die Schwerachse des Querschnitts gesenkt, woraus sich eine sehr bedeutende Verminderung der Spannungen ergibt.

Es wird also ein Eisenbetonbauteil mit Vorspannung viel höhere Lasten tragen können als ein Eisenbetonbauteil der seither üblichen Art.

Der Nutzen ist groß. Um dessen Größenordnung zu bestimmen, möchte ich das Beispiel eines Eisenbetonbalkens rechteckigen Querschnitts nehmen, der für eine Betondruckspannung von 50 kg/cm² und für eine Eisenzugspannung von 1500 kg/cm² berechnet ist. Nimmt man $n = 10$ an, so liegt die neutrale Faser in $^1/_4$ der Entfernung zwischen der am stärksten auf Druck beanspruchten Faser und der Bewehrung.

Durch das Hervorrufen von Vorspannungen kann man die Nullinie so viel senken, wie man es will. Praktisch kann man sie in die Nähe der Bewehrung bringen. Die Druckzone, die den ganzen Balken umfaßt, ist dann viermal so groß wie im vorhergehenden Fall. Wohl wird dann der Hebelarm von $^{11}/_{12}$ auf $^2/_3$ der Entfernung der Bewehrung von der am meisten gedrückten Faser verringert, aber trotzdem wird die mit der gleichen Höchstbeanspruchung von 50 kg/cm² aufnehmbare Belastung im Verhältnis

$$4 \cdot \frac{\frac{2}{3}}{\frac{11}{12}} = \frac{96}{33}$$

vergrößert, also etwa verdreifacht.

Dieser besseren Ausnutzung des Betons steht entgegen, daß die Spannung in der Bewehrung um $\frac{33}{24}$ vergrößert wird, aber dies ist wenig störend, denn der Eisenaufwand nach Gewicht beträgt nur $^{33}/_{84}$ desjenigen im gewöhnlichen Eisenbetonbalken.

Die Wirkung dieser Herabsetzung der Spannung wird natürlich erhöht, wenn man, wie dies folgerichtig ist, mit der Verwendung von Vorspannungen die Verwendung von hochwertigem Beton verbindet. Man kann dann für Platten gegebener Dicke Spannweiten in Betracht ziehen, die dreimal so groß wie die üblichen Spannweiten sind und die aus Gründen, die ich schon angegeben habe, nur zu Formänderungen annehmbarer Größenordnung Veranlassung geben werden. Man erkennt hieraus unmittelbar die praktische Bedeutung dieser Folgerungen, für Balken oder Pilzdecken.

c) Schubspannungen.

Aus der Verwendung von Vorspannungen ergeben sich hinsichtlich der Schubspannungen mindestens ebenso große Vorteile, wie ich sie für die Biegungsspannungen angegeben habe.

Um sie zu zeigen, genügt es, die *Mohr*'schen Diagramme aufzuzeichnen, die sich auf einfachen Schub, auf Schub im Verein mit einer oder zwei Zugkräften oder einer oder zwei Druckkräften beziehen.

Diese Diagramme zeigen, wie das Schwinden Zugkräfte hervorruft, die Hand in Hand mit Schub gehen. Sie zeigen auch, daß eine Druckkraft in nur einer Richtung schon sehr stark die Höchstzugspannungen[3] verringert und daß zwei

[3] Für die durch Versuche gefundenen Bestätigungen dieser Tatsache siehe „Science et Industrie", Januar 1933.

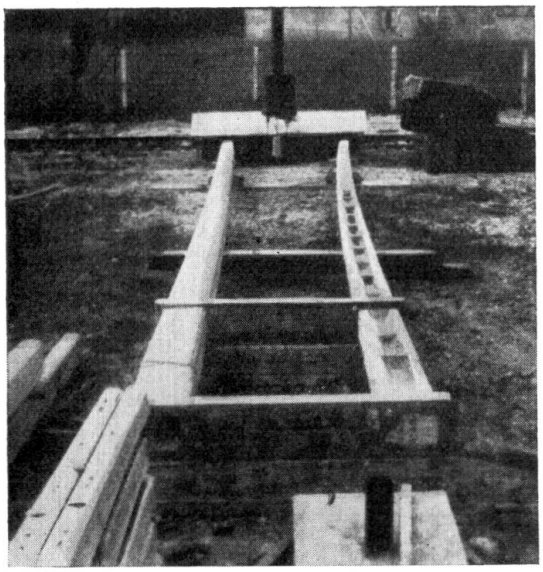
rechtwinklige Druckspannungen sie zum Verschwinden bringen können. Das günstigste System ist dasjenige mit zwei Druckkräften, die gleich dem Schub sind. Die gefährlichste Spannung ergibt eine Druckbeanspruchung von doppelter Größe des Schubes. Man kann dann in der Berechnung als Grenzgröße für den Schub die Hälfte der zulässigen Betondruckspannung einsetzen, was eine hervorragende Ausnutzung hochwertigen Betons und eine gewaltige Verringerung der Abmessungen im Vergleich mit den üblichen gestattet.

d) Widerstandsfähigkeit gegen wiederholte Beanspruchungen.

Bauteile aus gewöhnlichem Eisenbeton widerstehen schlecht wechselnden Beanspruchungen, was übrigens auch für genietete Eisenkonstruktionen gilt.

Die Erfahrung beweist, daß einer Vorspannung unterworfene Bauteile sich sehr viel besser verhalten.

Man hat einen Mast A mit Vorspannung und einen gewöhnlichen Mast B, je 12 m lang und 2 m von ihrem unteren Ende eingespannt, wechselnden Belastungen ausgesetzt. (Bild 1, 2, 3 und 4.)



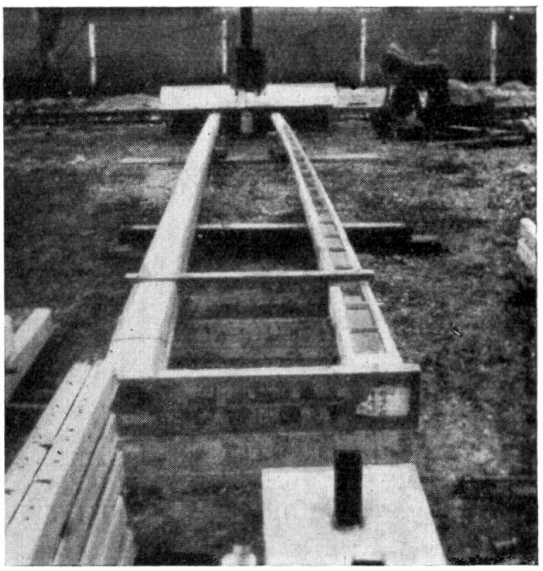


Fig. 1 und 2.

Die Pfosten A (links) und B (rechts) sind Belastungen unterworfen, die sie zusammenbringen (Fig. 1) und voneinander entfernen wollen (Fig. 2).

Der 5 Monate alte Mast A enthielt 50 kg Eisen und hatte ein Gewicht von 750 kg. Der Mast B war 18 Monate alt und enthielt 130 kg Eisen bei einem Gewicht von 980 kg.

Die an gleichartigen Masten gemessene Bruchlast betrug für beide Maste ungefähr 980 kg.

Die an der Spitze der Maste angreifende Last wechselte etwa achtmal in der Minute zwischen — 450 kg und + 450 kg.

Nach einigen hundert Lastwechseln war der Mast B stark rissig, und er brach vollständig nach einigen tausend Lastwechseln. Der Mast A hat 500000 Lastwechseln ohne nennenswerte Veränderung widerstanden.

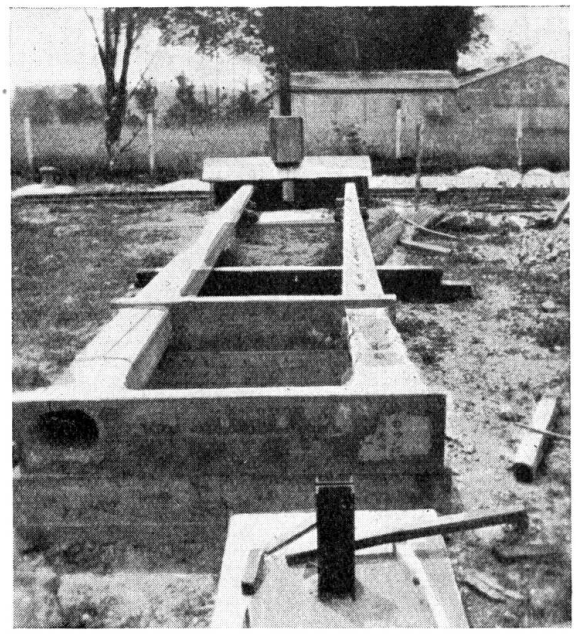


Fig. 3.

Die Pfosten A und B am Ende der Versuche (Pfosten B ist ganz gerissen).

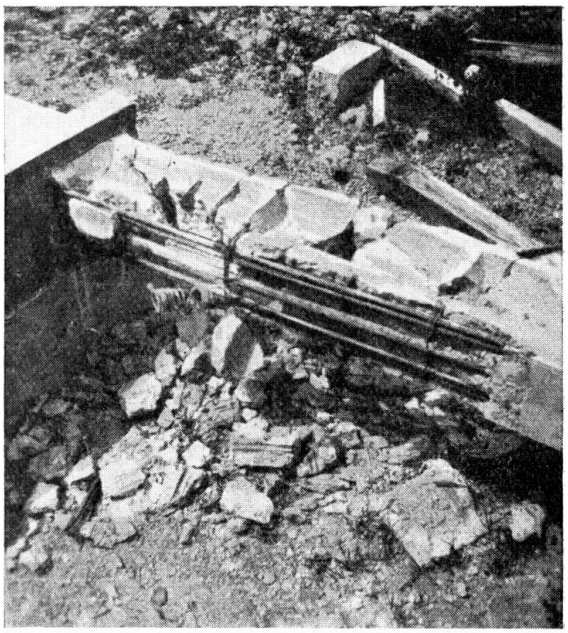


Fig. 4.

Einzelheit des Pfostens B nach den Versuchen.

Allgemeine Bedingungen für die praktische Anwendung von Vorspannungen. Notwendigkeit, die Spannungserteilung mit sehr niedrigen Kosten auszuführen.

Ich habe gezeigt, daß es theoretisch möglich ist, die Eisenbetonteile im Augenblick ihrer Herstellung mit mechanischen Eigenschaften zu versehen, die eine volle Ausnutzung der Güteeigenschaften von hochwertigem Stahl und Beton gestatten und ihnen darüber hinaus Vorzüge verleihen, wie eine starke Verminderung der Höchstdruckspannungen in auf Biegung beanspruchten Bauteilen, der Höchstzugspannungen in auf Schub beanspruchten Bauteilen und eine bedeutend größere Widerstandsfähigkeit gegenüber wiederholten Beanspruchungen.

Um diese Möglichkeiten in die Wirklichkeit umzusetzen, muß man zwei Probleme lösen.

Zunächst die Spannungserteilung an die Bewehrung, dann die praktische Herstellung von hochwertigem Beton, und dies mit genügend niedrigen Kosten, um von den Ersparnissen an Baustoffen auch im wirtschaftlichen Ergebnis möglichst viel beizubehalten.

Eine gewöhnliche Bewehrung aus Eisen mit einer Streckgrenze von 24 kg/mm² kostet einschließlich Verarbeitung etwa 1 Fr/kg.

Eine Bewehrung von 3,5 kg Gewicht kostet demnach 3,5 Fr/m. Sie kann mit der gleichen Sicherheitszahl durch eine Bewehrung aus Stahl mit einer Streckgrenze von 84 kg/mm² ersetzt werden, die 1 kg/m wiegt und unverarbeitet 0,90 Fr/m kostet; diese muß aber einer Spannung von ungefähr 8000 kg unterworfen werden. Die Ersparnis beträgt also 2,60 Fr. je Meter Stablänge, wovon die durch nachstehende Arbeitsvorgänge verursachten Kosten abgezogen werden müssen:

1. Schneiden des Stabes und Herstellen der endgültigen Verankerung mit dem Beton.

2. Schaffen von Hilfsverankerungen an den Enden des Stabes an zwei Stellen im Innern der Schalung, die imstande sind, einer Beanspruchung von 8000 kg zu widerstehen.

3. Erzeugen dieser Zugkraft von 8000 kg zwischen den Verankerungsstellen und Aufrechterhalten derselben während des Einbringens und Erhärtens des Betons.

4. Entfernen der Hilfsverankerungen, die sich im Innern der Schalung eingelassen im Beton befinden und Übertragung der Spannungen, die sie aufnehmen, auf die endgültigen Verankerungen, die sich gegen den Beton abstützen; Schließen der durch diese Beseitigung im Beton hervorgerufenen Löcher.

Damit sich hieraus ein Nutzen ergibt, müssen die Selbstkosten dieser verschiedenen Vorgänge geringer sein als das Produkt aus Stablänge mal 2,60 Fr. Außerdem muß noch berücksichtigt werden, daß das Ausschalen fast immer so lange verzögert wird, bis der Beton auf Druck beansprucht werden kann, was einen hohen Erhärtungsgrad bedingt. Man muß also die Unkosten berücksichtigen, die sich aus der Verlängerung der Zeit ergeben, während der die Schalungen für andere Zwecke nicht zur Verfügung stehen.

Die Kosten für die Spannungserteilung wachsen im allgemeinen weniger schnell als die Kräfte an. Sie sind auch von der Länge der Stäbe fast unabhängig; im Gegenteil, die Ersparnisspanne steigt proportional zur dritten Potenz der Längenabmessungen. Daraus ergibt sich, daß im Gegensatz zu dem, was man zunächst glauben könnte, die praktischen Probleme der Spannungserteilung an die Eisen umso leichter zu lösen sind, je größer die Abmessungen der Teile und je größer die zu entwickelnden Kräfte sind. Bei Bauteilen kleiner Abmessungen und bei geringen Kräften ist eine Lösung nur möglich, wenn es sich um oft zu wiederholende Reihenherstellungen handelt.

Der Spielraum ist mit Ausnahme des Falles sehr starker Bewehrungen gering, und man kann sagen, daß das praktische Problem der Verwendung von hochwertigem Stahl auf der Senkung der Kosten für die Verankerungsvorrichtungen und die Spannungserteilung an die Bewehrung beruht. Diese Bedingung verbunden mit der Tatsache, daß die Spannvorrichtungen die gleiche Widerstandsfähigkeit wie die Bewehrung haben müssen und diese auch nicht schwächen dürfen, scheidet die Mehrzahl der üblichen Spannvorrichtungen und besonders die Systeme, die mit Schraube und Mutter arbeiten, aus.

Ich habe jedoch mit Erfolg eine Befestigung der Eisen durch Einspannen zwischen Klauen oder Keilen oder durch elektrisch aufgeschweißte Ösen erreicht (Fig. 5).

Zwischen den Bewehrungen fehlt es oft an Platz, und die Spanngeräte dürfen dann nur einen kleinen Raum beanspruchen. Dies bedingt die Anwendung von Stählen höchster Güte, die im Hinblick auf eine Verbesserung ihres Widerstandes gegen Zugbeanspruchung und Abnutzung besonders behandelt wurden. Man vermeidet diese Schwierigkeiten, wenn man die Bewehrungsstäbe in vorher hergestellten Betonteilen vergießt. Diese werden dann in den Schalungen durch einfache Reibung, durch zweckmäßig ausgebildete Rillen oder durch andere Mittel festgehalten, deren Auswahl sich den besonderen Bedingungen jeder Anwendung anpaßt.

Beziehung zwischen den Problemen der Spannungserteilung an die Bewehrung und der schnellen Erhärtung des Betons.

Die Notwendigkeit, sehr niedrige Selbstkosten für das „unter Spannungsetzen" der Eisen zu erzielen, führt zur Suche nach verbesserten Arbeitsgeräten, welche die Handarbeit auf ein Mindestmaß verringern.

Aber diese Geräte, die sehr hohen Beanspruchungen widerstehen müssen, sind teuer, und sie werden während der ganzen Dauer der Erhärtung des Betons festgelegt.

Man hat also ein sehr großes Interesse daran, diese Erhärtung zu beschleunigen, und man kann sagen, daß die Möglichkeit der praktischen Anwendung der Vorspannungen mit der Entwicklung von Verfahren zur schnellen Erhärtung des Betons verbunden war.

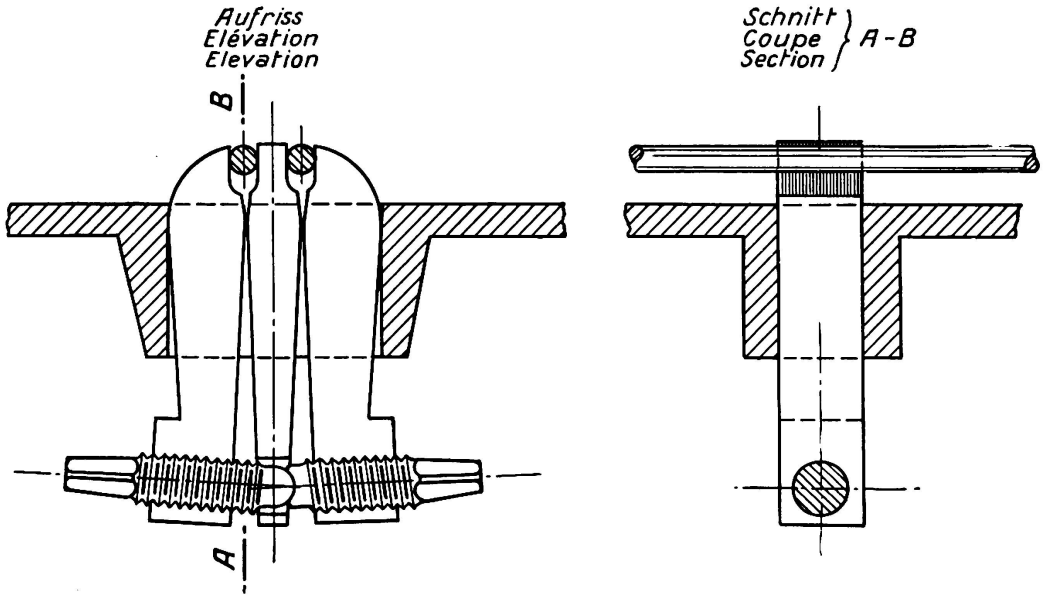


Fig. 5,

Einklemmen der Stähle in Backen.

Ich habe bereits die Mittel beschrieben, die es mir gestattet haben, sehr hohe Betonfestigkeiten äußerst rasch zu erzielen.

Sie bestehen in einer Behandlung des Betons, durch Rütteln, Druckeinwirkung und, beim Portland- und den Schlackenzementen, einer Erwärmung auf 100° und mehr.

Eine ausreichende Erhärtung, um eine sichere Aufnahme der Vorspannungen zu gewährleisten, ist in einer Frist erreicht worden, die für gute Portlandzemente $1^1/_2$ Stunden, gerechnet vom Zeitpunkt des Einbringens in die Schalung, beträgt. Mit den Schlackenzementen erhält man sehr gute Erhärtung in 2 bis 5 Stunden, und zwar je nach den Zementen und den Erwärmungsbedingungen.

Die Erwärmung läßt sich leicht mit Wasserdampf erreichen, wenn man zweckmäßig ausgebildete Schalungen benutzt. Durch die Abbindewärme überschreitet die Temperatur des Betons nicht selten die des Dampfes beträchtlich. Deshalb ist auch der Dampfverbrauch gering. Man braucht nur 10000 bis 20000 Kalo-

rien zuzuführen, um 1 m^3 Beton von 10 auf 100° zu bringen. Die Kosten für das Erwärmen des Betons betragen in der Praxis nur einige Franken je m^3.

Eine der Folgen der augenblicklichen Erhärtung des Betons ist die Möglichkeit, Bauwerke mit langen Bewehrungen in einzelnen Teilen zu betonieren, wobei die Bewehrung nach Erhärtung einzelner Abschnitte des Bauwerks mit einfachen und doch handlichen und billigen Geräten in Spannung gesetzt wird.

Ich werde zeigen, daß diese Technik sehr wichtige Anwendungen finden kann.

Beschaffung von Stählen mit hoher Streckgrenze.

Vor jeder Anwendung muß man sich mit Stahl geeigneter Güte zu einem Preis und in einer Form versorgen, die seine praktische Verwendung ermöglicht.

Diese Stähle müssen eine hohe und gleichmäßige Streckgrenze besitzen. Sie müssen vollkommen gerade und dürfen nicht spröde sein. Die Forderung gerader Stähle ist von sehr großer Bedeutung, weil ein Richten von Stählen mit hoher Streckgrenze, die sich wie Federn verhalten, mit den üblichen Verfahren auf den Baustellen unmöglich ist.

In Frankreich findet man im Handel keine Stähle mit hoher Streckgrenze, deren Preis von derselben Größenordnung wie der gewöhnlichen Betonrundeisen ist. Gezogene Stahldrähte sind zu teuer und haften schlecht am Beton.

Die Handelssstähle, deren Eigenschaften sich am meisten denen nähern, die für die von mir beabsichtigten Anwendungen erforderlich sind, sind Maschinendrähte, die im rohen Zustand eine ausreichend gleichmäßige Bruchgrenze von etwa 100 kg/mm^2 besitzen, deren Streckgrenze aber stark schwankt und zuweilen kaum höher als die von gewöhnlichem Eisen ist.

Man erhält sie bis zu einem Durchmesser von 16 mm in Ringen oft unregelmäßiger Form, die 50 bis 150 kg wiegen, und zu einem Preis, der wenig höher ist als derjenige des gewöhnlichen Betonrundeisens, was vor allem auf die geringe Nachfrage nach solchen Stählen zurückzuführen ist.

Man muß also diese Ringe in gerade Drähte mit hoher Streckgrenze verwandeln, ohne daß hierdurch der Preis wesentlich erhöht wird.

Ich habe Maschinen geschaffen, die diese Umwandlung mit einem Kostenaufwand von einigen Centimes je Kilogramm ausführen können (Fig. 6).

Um jeden Verlust durch Abfälle zu vermeiden, wird durch Lichtbogenschweißung an das Ende jedes Kranzes der Anfang des nächsten angeschweißt. Die Schweißstelle wird dann durch die Schweißmaschine selbst einer nochmaligen Behandlung unterworfen. Diese Vorgänge erfordern einige Sekunden und liefern eine Schweißstelle, die genau die gleiche Festigkeit wie der Draht besitzt. Hiernach nimmt die Maschine den Draht auf, der zuerst zwischen Walzen, die in zwei zueinander senkrecht stehenden Ebenen angeordnet sind, grob ausgerichtet und dann zwischen Klemmen gespannt wird, die durch hydraulische Pressen im Abstand von n Meter angezogen werden. Eine dieser Klemmen ist fest, die andere auf einem Schlitten befestigt, der durch eine Presse bewegt wird, wodurch das Spannen des Drahtes erfolgt. Ein reibungsloses Ventil bewirkt, sobald die n Meter Draht im gewünschten Ausmaß gedehnt sind, die Entlastung der Presse und deren Rückkehr in die Ausgangsstellung mit einer durch eine einstellbare hydraulische Bremse bestimmten Geschwindigkeit. Die für die Streckspannung erzielte Genauigkeit ist $^1/_{100}$.

Ein Teil $\frac{n}{p}$ des Drahtes wird nun aus der Maschine herausgeführt. Man kann ihn entweder gerade lassen oder ihn aufrollen, wobei ein Halbmesser zu wählen ist, der ausreicht, um eine Formänderung zu veranlassen, die ausschließlich elastisch ist.

Der Vorgang wird dann selbsttätig wiederholt, die Schweißstellen gelangen in die Maschine und werden gleichfalls der Dehnung unterworfen.

Man erhält einen Draht beliebiger Länge, dessen Streckgrenze ungefähr dem Grad der Dehnung entspricht und der in jedem Punkt, einschließlich der Schweißstellen, p mal dieser Dehnung unterworfen wurde.

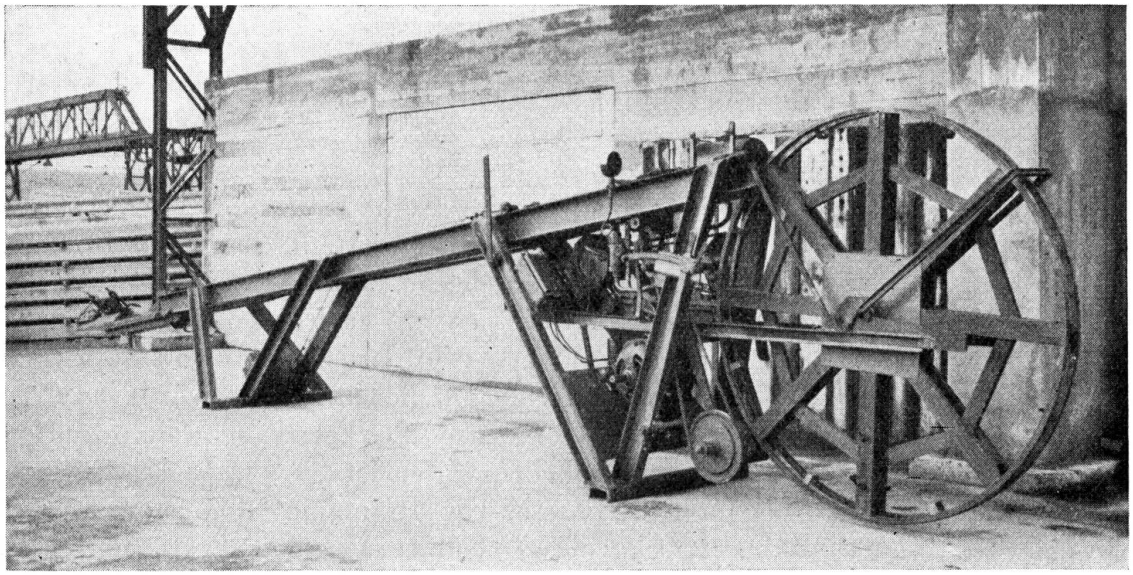


Fig. 6.

Maschine zur Erhöhung der Streckgrenze der Stähle.

Man erreicht leicht Streckgrenzen zwischen 80 und 90 kg/mm², also $3^1/_2$ mal so viel wie bei gewöhnlichen Rundeisen. Im Verlauf dieses Vorganges wird der Draht um ungefähr 5 % gestreckt.

Sobald die Nachfrage für harte Drähte bedeutend sein wird, könnten die Hüttenwerke zweifellos unmittelbar gereckte, gehärtete, geglühte und nochmals gereckte Stähle von einer im Hinblick auf das Erzielen sehr hoher Festigkeiten untersuchten chemischen Zusammensetzung liefern, für die das Verhältnis

$$\frac{\text{Preis}}{\text{Streckgrenze}}$$

bis zu Durchmessern von 16 mm, die mit Bezug auf die Festigkeit Stäben aus gewöhnlichem Eisen von ungefähr 35 mm gleichwertig sind, bedeutend niedriger als das gegenwärtig erzielte Verhältnis wäre. Diese Stähle können leicht in der Form von Ringen großen Durchmessers befördert werden, wobei sie nur mit einer elastischen Formänderung aufgerollt werden, so daß die Eisen beim Abrollen praktisch gerade sind.

Die Anwendung dieser Stähle bringt Einzelprobleme, wie Schneiden, Her-

stellung der Haken usw. mit sich, was nicht wie bei gewöhnlichem Eisen möglich ist. Die Lösung bietet aber keine solchen Schwierigkeiten, daß dadurch der Gestehungspreis wesentlich erhöht würde.

Anwendungen.

Die von mir ausgeführten Anwendungen gehören zwei unterschiedlichen Gruppen an: 1. Die Gruppe der auf einmal hergestellten Gegenstände oder Bauteile, wie Maste für elektrische Leitungen, Schwellen, Balken beschränkter Abmessungen, fabrikmäßig hergestellte Rohre. 2. Die viel wichtigere Gruppe der zylindrischen oder nahezu zylindrischen Konstruktionen (wobei dieser Ausdruck im weitesten Sinne gedacht ist), die unter Verschiebung der Schalung längs des Abschnittes, der ohne Unterbrechung ausgeführt wird, in einzelnen Teilen angefertigt werden.

Ich habe in «Science et Industrie» vom Januar 1933 zusammenfassende Angaben über nach meinen Verfahren ausgeführte elektrische Leitungsmaste gebracht und will hierauf hier nicht zurückkommen.

Die Einrichtung von Anlagen, die diese Fabrikation unter Bedingungen fast absoluter Vollkommenheit beinahe selbsttätig ausführen, ist heute beendet. Ich habe in gleicher Weise die Herstellung von Eisenbahnschwellen vorgenommen. Diese Maschinen erzeugen Gegenstände aus Beton mit einer Festigkeit von über 1000 kg/cm² und einer Ausgangspressung von 100 bis 300 kg/cm², die eine vollkommen glatte und dichte Oberfläche haben.

Ich werde jetzt mit einigen Einzelheiten eine Anwendung der 2. Gruppe beschreiben, die gelegentlich der Unterfangung der Gründung des Überseebahnhofs in Le Havre stattfand und die wegen der dabei angetroffenen und gelösten technischen Schwierigkeiten wie auch wegen der bedeutenden Werte, die sie zu erhalten erlaubte, von Wichtigkeit ist.

Der Überseebahnhof in Le Havre hat eine Länge von 600 m, eine Breite von ungefähr 55 m und besitzt im größten Teil seiner Fläche zwei übereinander liegende Decken, von denen jede mit 2500 kg/m² belastet ist, außerdem eine Terrasse. Er war auf Ortspfählen gegründet, die bis zur Kote (0,00) (die Oberkante der Bahnsteige liegt auf 9,50) durch neuere Schüttungen herabführen. Diese bestanden aus Baggergut und lagen auf einer wenig mächtigen Kiesschicht auf, die ihrerseits auf Schlick ruht, der sich bis zur Kote (— 20) erstreckt, wo eine sehr feste Kiesschicht ansteht (Fig. 7). Das Gebäude ist auf einer seiner Längsseiten mit einer Ufermauer verbunden, die auf den Kies gegründet ist und vor der man den Schlick bis auf — 12 (d. i. 22 m unterhalb der Oberkante Kaimauer) ausgebaggert hat, um ein Flutbecken zu schaffen. Auf der ganzen Sohle des Erdgeschosses sind Lasten von 6000 kg/m² vorgesehen.

Man hat seit der Fertigstellung des großen Bauwerkes festgestellt, daß der Baugrund, in dem die Gründungspfähle eingetrieben waren, sich im Ganzen mit dem Gebäude nach einem ungefähr geradelinigen Zeitgesetz und zwar um etwa 1 cm je Monat senkte. Diese Bewegungen mußten unbedingt in kürzester Frist zum Stillstand gebracht werden. Hierfür konnte man nur ein einziges Mittel in Betracht ziehen: Übertragung der Lasten des Gebäudes, seines alten Unterbaues, etwaiger Überbelastungen und eines Teiles der Aufschüttung, der

ausreichte, um das Gleichgewicht der Schlickschichten wieder herzustellen, das durch die Ausführung der Ufermauer, das Aufschütten, das Baggern und die Lasten des Bauwerks gestört war, auf die auf etwa (— 20) liegenden festen Schichten. Dies machte das Eintreiben von 30 m langen Pfählen erforderlich. Nun befindet sich die Unterkante der Decke des Erdgeschosses ungefähr 5 m über dem Boden, und Wasser wird in geringer Tiefe angetroffen. Es war auch unmöglich, auf das Rammen zurückzugreifen, da dieses den Schlick in Bewegung gesetzt und die Standsicherheit des Gebäudes, vielleicht auch der Ufermauer hätte gefährden können. Nur ein Abpressen unter ständigem Druck war möglich. Auch hierbei waren Änderungen des Gleichgewichtes im Untergrund, die der Gesamtheit des Systems schädlich sein mußten, zu befürchten, sowie auch die Verflüssigung der Schlickschichten durch wiederholte Störungen oder den durch die Volumenverringerung beim Abpressen hervorgerufenen Druck.

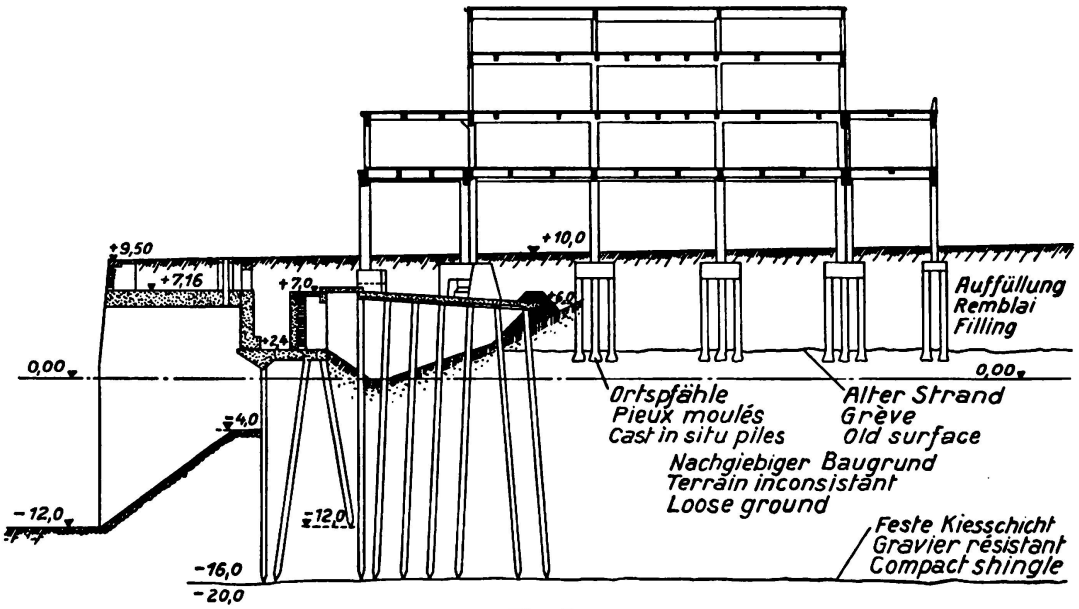


Fig. 7.

Querschnitte durch den Hafenbahnhof in Le Havre.

Man mußte also ein Mittel zur Regelung des durch das Abpressen der Pfähle entstehenden Druckes suchen. Man wußte schließlich, daß man Hindernisse antreffen würde, die zu beseitigen waren, kieshaltige Schichten, die ausgebaggert werden mußten. Die Größe der Lasten und die Versperrung durch den alten Unterbau waren derart, daß für die Mehrzahl der Pfähle Lasten von etwa 200 t je Pfahl und noch mehr nicht zu umgehen waren.

Die Gesamtgröße der unter diesen Bedingungen auf die Kote (— 20) zu übertragenden Lasten überschritt 150000 t. Dies entspricht dem Einrammen von 60 km starker Eisenbetonpfähle üblicher Art von je 75 t. Dies zeigt, daß sehr wirksame Hilfsmittel erforderlich gewesen wären.

Grundgedanke der in Ausführung begriffenen Lösung.

Ich habe dank der gemeinsamen Anwendung der Verfahren der Vorspannung und der schnellen Erhärtung des Betons für dieses Problem eine Lösung finden

können, die es gestattet hat, ungefähr acht Monate nach dem Baubeschluß und vier Monate nach dem tatsächlichen Beginn der Arbeiten den Stillstand der Senkungen in den Teilen zu erzielen, die sich mit der größten Geschwindigkeit senkten, wodurch in absehbarer Zeit das Gebäude gefährdet gewesen wäre. Diese Gefahr ist heute überwunden.

a) Verbindungsbalken zwischen den bestehenden Fundamenten.

Die Säulen des Gebäudes waren ursprünglich auf Eisenbetonplatten gestellt worden, deren Abmessungen bis zu 4,40 m × 3,40 m × 1,40 m (Fig. 8 und 9) erreichen. Man hat damit begonnen, diese Platten zu durchgehenden Balken auszubilden, die dazu bestimmt sind, die Lasten der Gründung auf die neuen Pfähle zu übertragen und Stützpunkte für das Einpressen der Pfähle zu liefern. Dies wurde dadurch erreicht, daß man zwischen ihnen Beton einbrachte, der nur gegen sekundäre Kräfte bewehrt wurde, und dann in dem so gebildeten System eine allgemeine Druckbeanspruchung hervorrief, in dem man Zugeisen, die durch Streckung auf eine Streckgrenze von 80 kg gebracht waren und deren Enden in Betonblöcken verankert waren, von denen der eine fest und der andere

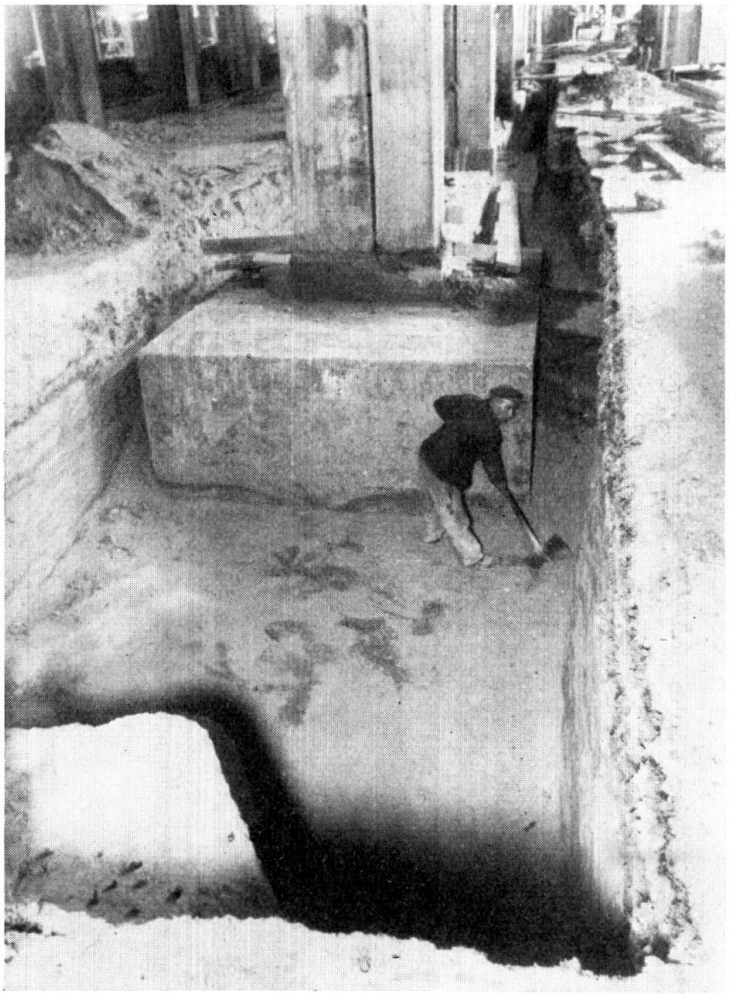


Fig. 8.

Jetziger Zustand der Fundamentplatten.

Fig. 9.

Verbindungsglieder zwischen den Fundamentsohlen während des Betonierens (im Vordergrund Schalungen für die Aussparungen in den Balken zum Einbringen der Pfähle und Zugschrauben).

durch Pressen bewegt wurde, unter eine Spannung von 50 oder 60 kg/mm² setzte. Die Pressen werden nach dem Verkeilen entfernt, und die Spannung ist dann dauerhaft (Fig. 10 und 11).

Durch dieses Verfahren hat man ohne Erneuerung und ohne Ausbesserung der unteren Teile der vorhandenen Platten, deren Beton und Bewehrungen ausgenutzt werden, Bauglieder geschaffen, die in der Lage sind, großen Biegungs-, Schub- und Verdrehungskräften zu widerstehen.

In den so betonierten Teilen werden zylindrische Hohlräume mit waagerechten Riffelungen (Fig. 12) angeordnet, durch jede Öffnung wird ein Pfahl (die Pfähle werden in laufendem Betrieb hergestellt) mit Pressen eingebracht, die mit den Balken durch in diese eingeschraubte Anker verbunden sind und die auf Halsstücke wirken, die leicht mit den Pfählen fest verbunden werden können.

b) Beschreibung der Pfähle.

Die Pfähle sind Hohlzylinder von 0,60 m Außen- und 0,37 m Innendurchmesser. Ihr Nutzquerschnitt ist 1750 cm². Sie sind in der Längsrichtung mit acht Hartstahldrähten von 8 mm Durchmesser und in der Querrichtung mit Ringen aus 6 mm Draht gleicher Güte bewehrt. Das Gesamtgewicht der Bewehrung beträgt 10 kg je m Pfahllänge. Die Pfähle widerstehen trotz dieses

geringen Eigengewichtes einem Druck von über 300 t in Verbindung mit einer Biegebeanspruchung von 50 mt, was eine Höchstleistung darstellt.

c) Verfahren der Pfahlherstellung.

Nehmen wir an, daß der Pfahl bis zum Teil N fertiggestellt ist. Die Längsbewehrungen, deren Länge nicht im voraus begrenzt ist, werden in Ringen von genügend großem Durchmesser aufgerollt geliefert, so daß sie nur elastische

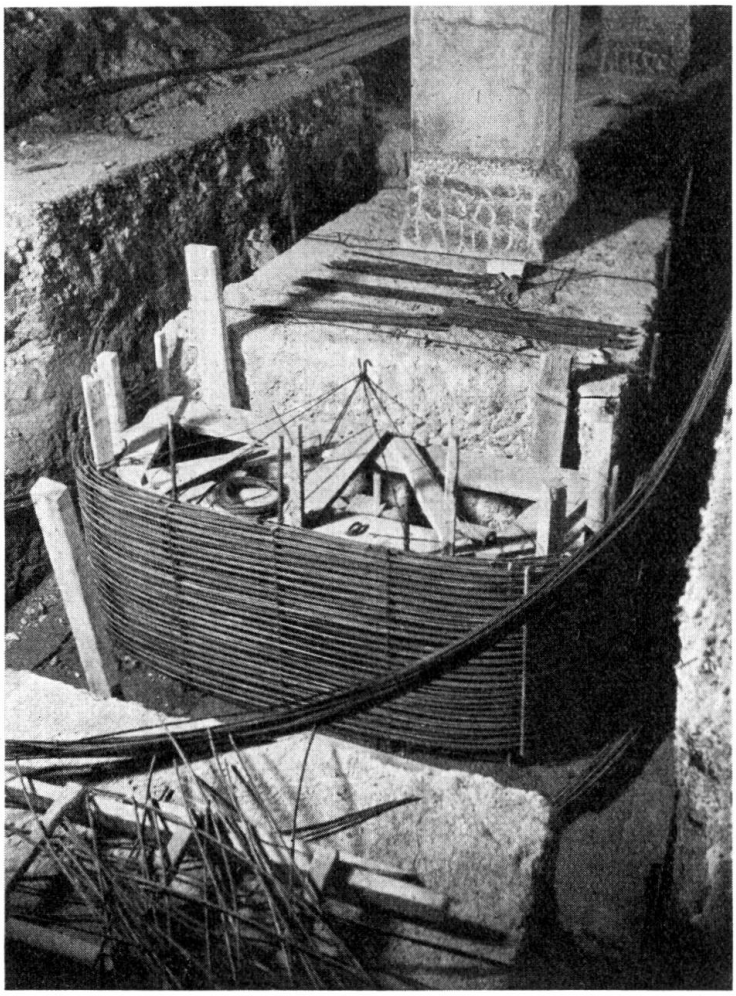


Fig. 10.
Bewehrung des Endes eines Zugbandes.

Formänderungen erleiden. Sie laufen von Zwischenfällen abgesehen, auf die ganze Pfahllänge ungestoßen durch (Fig. 13).

Die Außenschalung besteht aus einer Reihe von fünf bis acht zylindrischen Ringen von je 0,40 m Höhe, mit bearbeiteten Enden und in Halbringe geteilt, die man mittels Schrauben zusammenzieht. Um Pfähle mit einer waagerecht geriffelten Oberfläche zu erhalten, benutzt man in dem oberen Teil der Pfähle Ringe, die mit inneren waagerechten Riffelungen versehen sind. Die innere Schalung wird durch ein Stahlrohr gebildet, das von einer Gummihülle mit Baumwolleinlage umgeben ist. Das Stahlrohr ist an seinem unteren Ende durch ein Rohr kleineren Durchmessers verlängert, das von einer zweiten Gummihülle

Fig. 11.

Beweglicher Kopf eines Zugbandes während des Vorspannens und Verkeilens.

umgeben ist, wodurch eine wasserdichte Tasche entsteht, die den gleichen Außendurchmesser wie das Stahlrohr hat und durch Druckwasser gedehnt werden kann (Verschluß).

Der Raum zwischen den Schalungen ist an seinem oberen Ende durch eine ringförmige Platte verschlossen, die acht Löcher für die Durchführung der Längsbewehrungen und vier Einfüllöffnungen aufweist.

Wenn der Abschnitt N des Stückes fertiggestellt ist, löst man entsprechend dem Fortschreiten des Einpressens die Schrauben, die die Schalungsringe zusammenhalten mit Ausnahme derjenigen des obersten Ringes. Nun hebt man den Kern um die Höhe eines Abschnittes und verbindet die Längsbewehrungen mit den Ringen der Querbewehrung. Alsdann versetzt man die Ringe der Außenschalung und spannt die Längsbewehrungen, die oberhalb der Verschlußplatte hervorragen, in Klemmen, die paarweise in Lagern angeordnet sind, die man durch Schrauben derart anheben kann, daß man behelfsmäßig die Bewehrungen anspannt, die das Ganze zusammenhalten. Nun wird die Tasche des inneren Kerns aufgeblasen, um ein Eindringen des Betons zwischen die Hülle des Kerns und die Innenwandung des Abschnitts N zu verhindern und um einen Zwischenraum zwischen dem Stahlrohr und der Hülle herzustellen.

Man füllt dann die Form mit Beton, der für Seebauarbeiten je m^3 450 kg Portlandzement enthält.

Dieser Beton wird mittels elektrischer Rüttelvorrichtungen mit exzentrischer Masse, die an der Außenschalung befestigt werden, kräftig gerüttelt.

Fig. 12.

Gruppe von 4 Aussparungen. Die Stähle für die Unterdrucksetzung der Balken werden in die beidseitigen Rinnen gelegt.

Ein Teil des Überschußwassers entweicht durch die Fugen zwischen den Schalungsringen, ein anderer steigt an die Oberfläche, die dadurch weich gemacht wird. Man macht den Beton homogen, indem man auf die Einfüllöffnungen Röhren setzt, in die man, ohne das Rütteln zu unterbrechen, mittels Schraubenpressen Beton unter hohem Druck einpreßt. Hierdurch wird das Überschußwasser aus den oberen Teilen vertrieben. Hierauf schließt man die Einfüllöffnungen, hört mit dem Rütteln auf und preßt Wasser mit einem Druck von 20 kg/cm^2 zwischen den Kern und dessen Hülle. Dieser Druck wird durch den Beton, der unmittelbar nach dem Rütteln wie eine Flüssigkeit wirkt, hydraulisch auf die obere Abschlußplatte übertragen, die sich hebt und dabei die Eisen bis in die Nähe ihrer Streckgrenze spannt.

Dieser Druck wird 20 Minuten lang gehalten.

Alle Fugen der Schalungsringe klaffen und lassen reichlich Wasser durch. Der Beton wird äußerst trocken. Man umgibt die Schalung mit einer Wärmeschutzhülle, in die man Dampf ohne Überdruck einläßt. Die Temperatur des Betons steigt rasch auf über 100^0 an und nach einer Frist von etwa 3 Stunden wird eine Härte erreicht, die der eines hervorragenden Betons im Alter von mehreren Monaten vergleichbar ist, obwohl der Zement, der besonders für Seebauten benutzt wird, sehr träge ist und normalerweise nur mittelmäßige Endfestigkeiten liefert (Fig. 14, 15 und 16).

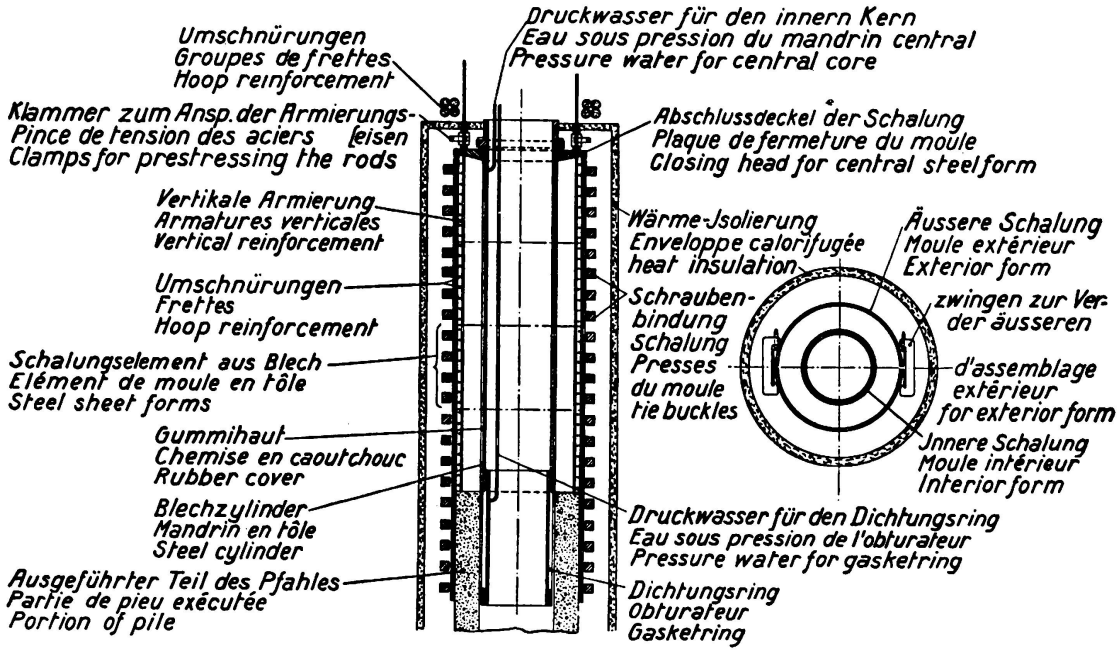


Fig. 13.

Schema der Schalung für einen Pfahl.

d) Abpressen der Pfähle.

Man führt nun sofort das Abpressen der Pfähle aus. Theoretisch sind hierfür Druckkräfte erforderlich, deren Höchstwert 320 t ist und denen man noch 20 kg Vorspannung hinzufügen muß, so daß man auf ungefähr 200 kg/cm² kommt. Laboratoriumsversuche zeigen, daß Festigkeiten der Größenordnung von 300 kg nach drei Stunden Erwärmung in Dampf von 100° erreicht wurden. Man mußte jedoch Biegungsmomente, die bedeutende Werte, besonders in den zuletzt ausgeführten Zonen, erreichen können, berücksichtigen und die Erfahrung hat deren Vorhandensein bestätigt. Ein Moment von 50 mt läßt die Beanspruchung auf 500 kg ansteigen. Andererseits ist der Bruch eines Pfahls im Boden ein schlimmer Fall.

Man führt das Abpressen also derart aus, daß die sehr großen Kräfte nur auf den Beton einwirken, der ungefähr 8 Stunden alt ist. Abgesehen von einigen Zwischenfällen, die sich besonders während der Anlernung des Personals ereignet haben, kommen jetzt keine Pfahlbrüche mehr vor.

Das zum Abpressen benutzte Gerät besteht aus einem Halsstück, das aus einem dichten zum Pfahl konzentrischen Rohr gebildet wird, in dessen Innern eine sehr widerstandsfähige Gummihülle mit Baumwolleinlagen angeordnet ist, die mit dem Rohr einen undurchlässigen ringförmigen Raum bildet. Zwischen dem Gummi und dem Pfahl werden parallel zum Pfahl Dauben mit engen Fugen angeordnet, die in dem Teil, der mit dem Pfahl in Berührung kommt, aus Stahl bestehen. Durch Einlassen von Wasser mit einem Druck von 30 kg/cm² in den wasserdichten Raum preßt man die Dauben mit einer Gesamtkraft von 100 t gegen den Pfahl. Da die Reibung zwischen Stahl und Beton größer ist als 0,40, schafft man so eine Längshaftung zwischen den Dauben und dem Beton, die in der Lage ist, mindestens 400 t zu übertragen. Nach dem Aufgeben

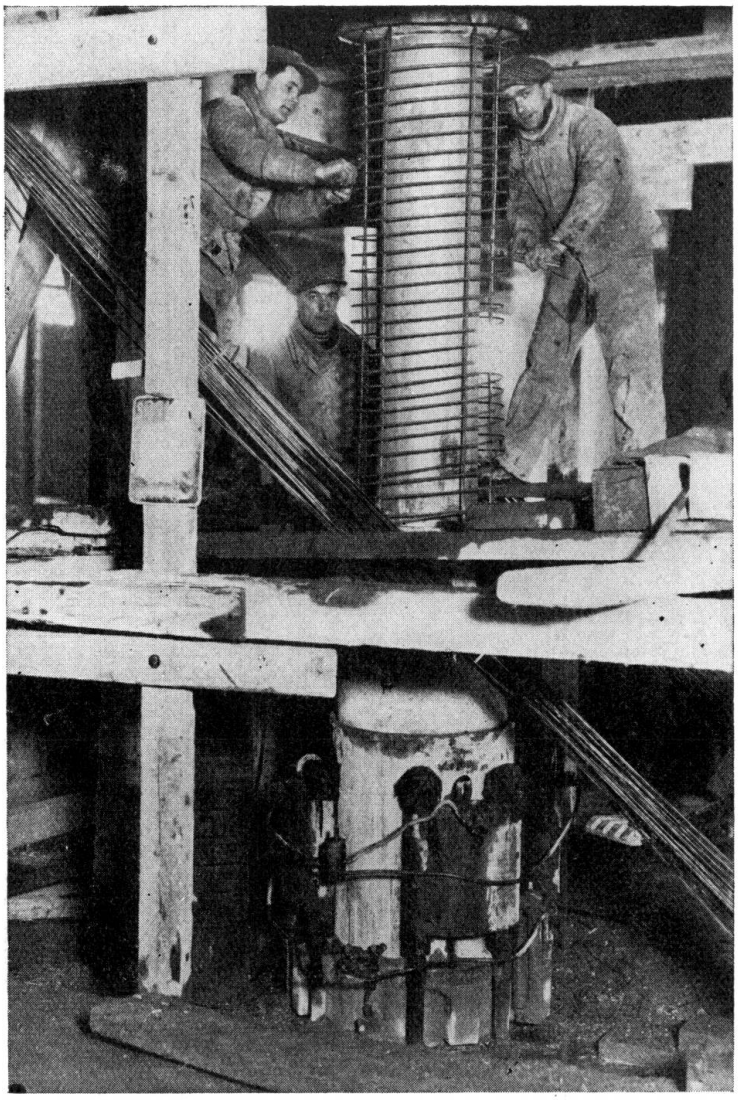


Fig. 14.

Bewehrung eines Pfahlstückes (im unteren Teil sieht man die Schraubenwinden).

des Druckes verschwindet jede Verbindung zwischen dem Pfahl und den Dauben (Fig. 17).

Man wirkt auf die Dauben mittels Stahlhalsstücken. Das obere Halsstück ist besonders widerstandsfähig und überträgt die Abpreßkräfte. Das untere Halsstück dient zum Anheben der Dauben und unter Umständen zum Herausziehen des Pfahles. Diese Halsstücke sind an das Rohr angeschweißt und bilden mit diesem eine Einheit.

Das obere Halsstück trägt vier angeschweißte Ösen, auf die sich die Kolben von ebensoviel hydraulischen Pressen legen (Fig. 18), die durch 8 Anker aus Hartstahl auf dem Balken befestigt sind, durch den hindurch das Abpressen des Pfahles geschieht. Die Anker fassen Schraubengänge, deren Gewinde in dem Beton der Balken selbst eingeformt sind. Jeder Anker nimmt eine Kraft von 40000 kg auf, und man hat festgestellt, daß er das Doppelte aufnehmen könnte, ohne im Beton, der die Schraubenmutter bildet, Störungen zu veranlassen.

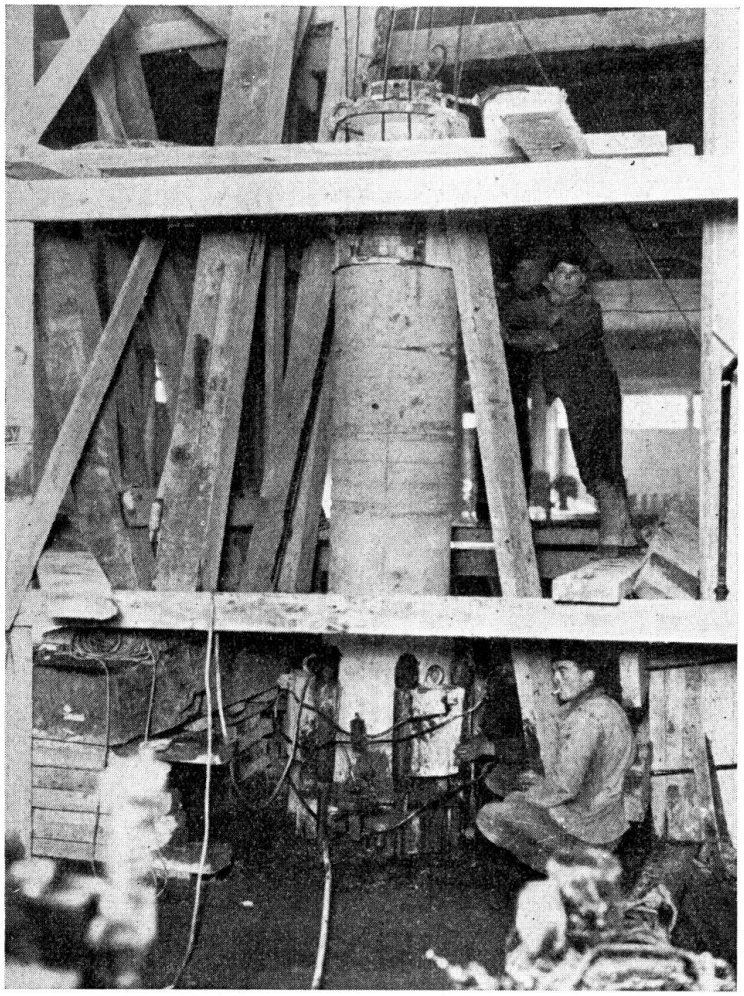


Fig. 15.

Ausschalung eines Pfahlstückes (unten die Schraubenwinden).

Die Vorgänge beim Abpressen bestehen:

1. Im Anpressen der Dauben gegen den Pfahl, in dem man Wasser unter 30 kg Druck in das Abpreßhalsstück einleitet,

2. Im Absenken des Pfahles durch gleichzeitige Einwirkung der vier hydraulischen Pressen. Der Pfahl sinkt unter der Wirkung von Kräften, die bis zu 320 t gehen, ohne Schwierigkeiten ab, sofern er keine Hindernisse antrifft, die man durch den mittleren Hohlraum zerstören oder beseitigen kann.

3. Befinden sich die Pressen am Ende ihres Hubes, so entfernt man den Druck in dem Halsstück und hebt dieses mittels zweier kleiner Spezialwinden an.

Dann wiederholen sich die Vorgänge.

Man unterwirft den Pfahl am Ende des Abpressens zahlreichen Lastwechseln durch eine Belastung von 300 t und anschließende Entlastung. Dann wird festgestellt, daß er unter einer Last von 300 t, die mehrere Stunden lang gehalten wird, nicht mehr merkbar herunter geht. Ein sehr deutlicher Stillstand wird im allgemeinen schnell erreicht. Für gewisse Pfähle jedoch erfordern diese Verfahren eine ziemlich lange Zeit von mehreren Tagen, während der der

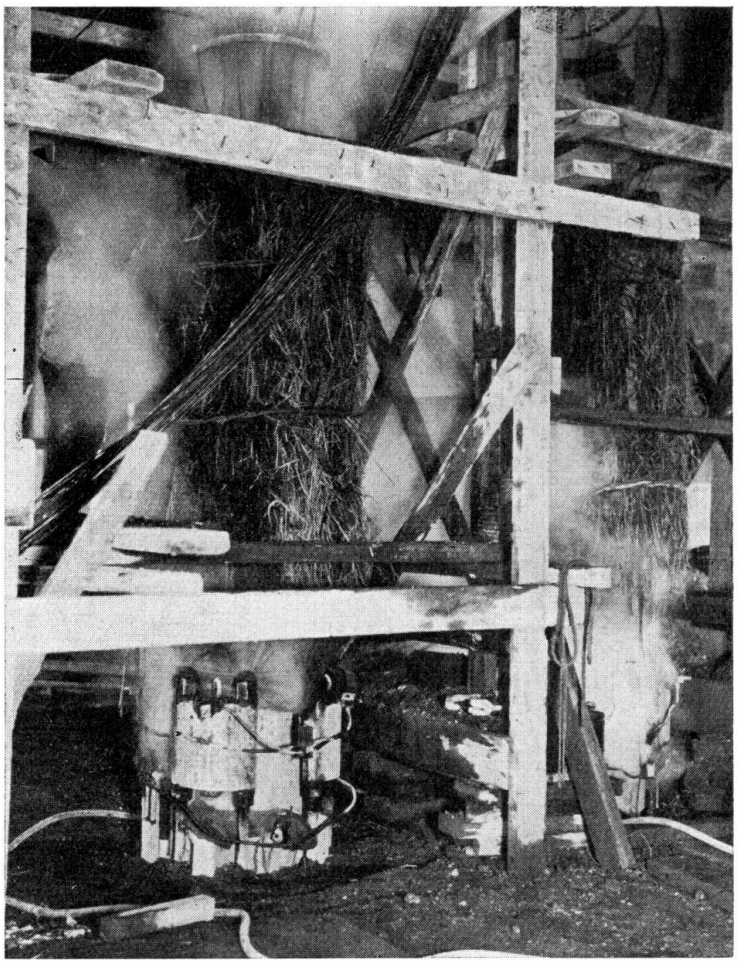


Fig. 16.

Zwei Pfähle während der Erwärmung.

Pfahl unter dem Einfluß der Belastungswechsel, noch um beträchtliche Maße, die sich in Dezimetern ausdrücken lassen, absinkt. Wenn der Pfahl fest sitzt, bringt man Beton in den ringförmigen Zwischenraum zwischen dem geriffelten Pfahlkopf und der gleichfalls geriffelten Wandung der Absenköffnung ein und läßt den Beton erhärten, während der Pfahl belastet ist. Das Abpreßhalsstück wird für diesen letzten Arbeitsgang durch eine Endplatte ersetzt.

Die so hergestellten Pfähle sind innen und außen von genauem Maß und bleiben im allgemeinen gerade. Gelegentlich werden sie jedoch durch Hindernisse im Boden von der Senkrechten abgelenkt und erleiden elastische Verbiegungen, die das Vorhandensein bedeutender Biegungsspannungen anzeigen.

Meistens werden diese Durchbiegungen durch langsame Formänderung des Bodens unter dem Einfluß elastischer Kräfte wieder verschwinden, wenn man den Pfahl in Ruhe läßt.

Das Anfertigen und das Abpressen eines Pfahles von 30 m Länge erfordern ungefähr vier Arbeitstage, wenn keine besonderen Hindernisse eintreten. Im Großen und Ganzen findet die Ausführung unter befriedigenden Bedingungen hinsichtlich der Schnelligkeit und der Kosten statt.

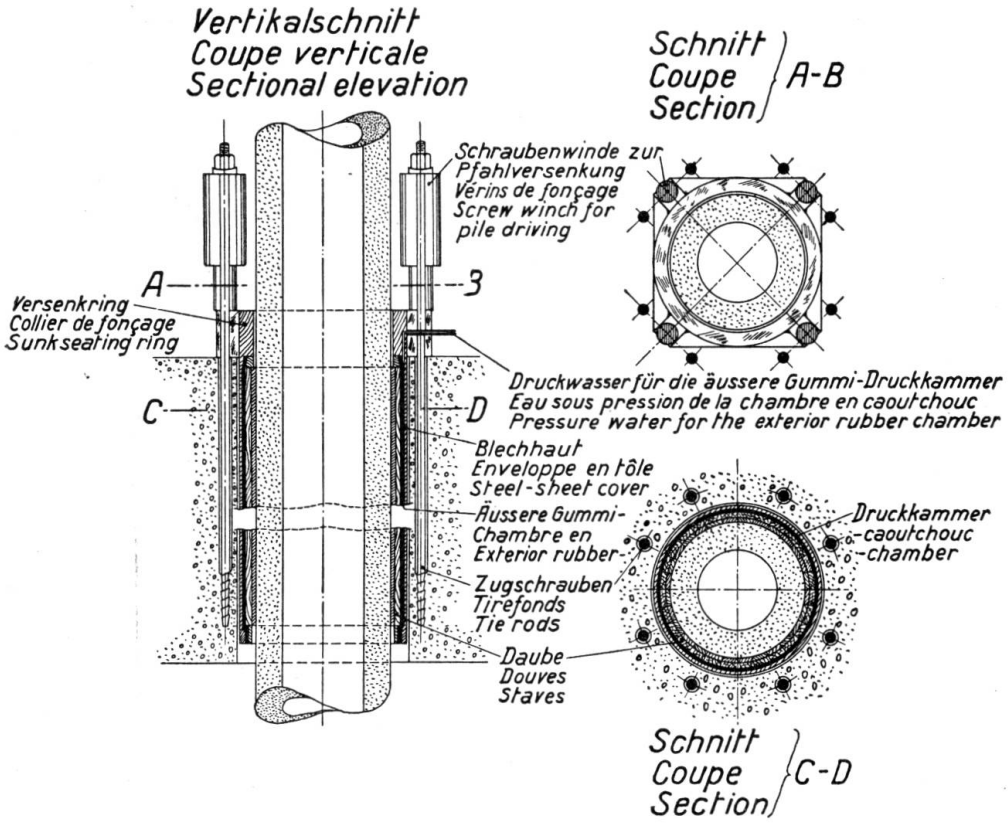


Fig. 17.

Schema der Einrichtung für die Pfahlversenkung.

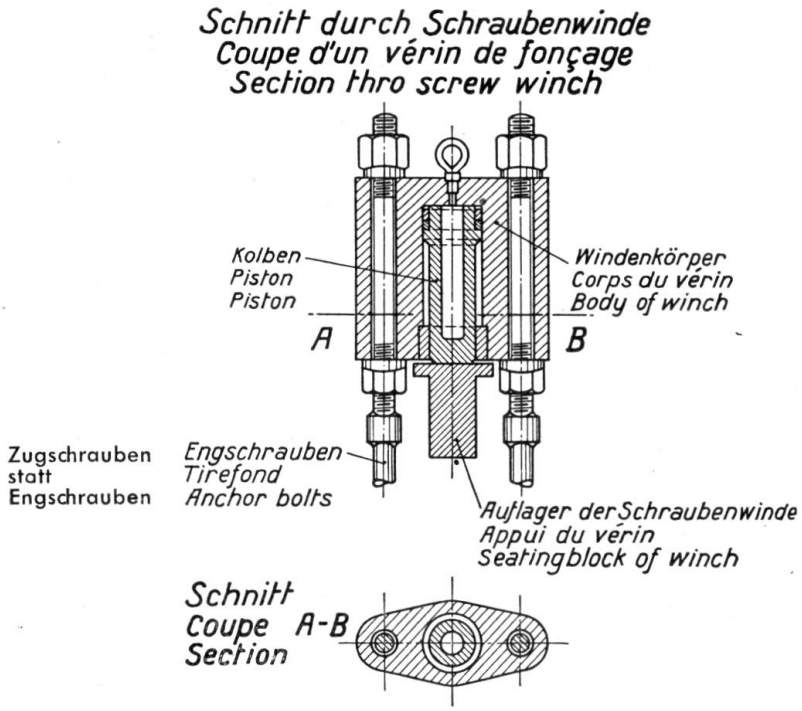


Fig. 18.

Detail einer Schraubenwinde.

Verschiedene Anwendungen des Pfahl-Herstellungsverfahrens von Le Havre.

Es ist einleuchtend, daß die oben beschriebenen Mittel Abänderungen gestatten, wodurch es möglich ist, sie der Anfertigung irgendwelcher Gegenstände im Wesentlichen zylindrischer oder prismatischer Form anzupassen. Hierzu gehören Pfähle und Gegenstände jeder Form, die gestampft, gepreßt oder auf sonstige Weise hergestellt werden, Säulen oder Pfeiler für den Hochbau, Kellerböden, Schleusenböden, Mauern, Panzerungen, Fußböden, Balken, Röhren, Betonstraßen usw.

In fast allen Fällen kann man handliche und so gut wie selbsttätig arbeitende Geräte schaffen, deren Anwendung nur geringe Kosten für die Handarbeit und die Abschreibung der Schalungen verursacht.

Die Frist für die Wiederverwendung der Geräte kann im allgemeinen auf einige Stunden und zuweilen sogar auf weniger verringert werden, wodurch es mit verhältnismäßig geringen Mitteln möglich ist, sehr hohe Ausführungsgeschwindigkeiten zu erreichen.

Die wirtschaftlichen Vorteile dieser verschiedenen Anwendungen ergeben sich aus meinen vorhergehenden Mitteilungen.

Ein besonders interessanter Fall ist die Herstellung von Rohren. Ich habe Geräte zusammengestellt, die, sei es in der Fabrik oder auf der Baustelle, im offenen Graben oder unter Tag, Rohre aller Durchmesser ohne Verbindungsstellen, in denen alle Quer- und Längseisen bis zu ihrer Streckgrenze unter Spannung stehen, selbsttätig anfertigen. Man erhält auf diese Weise eine Dichtigkeit, die bis zu Drücken, die nur durch die Spannung der Bewehrung der Größenordnung von 80 kg/mm² begrenzt sind, streng beibehalten wird. Ich habe im Laboratorium wasserdichte Rohre unter einem Druck von 250 kg/cm² erhalten.

Die Widerstandsfähigkeit gegenüber etwaigen Biege- und Schubbeanspruchungen ist bei gleicher Wandstärke zehnmal so groß als die der üblichen Rohre bester Fertigung. Ihre chemische Widerstandsfähigkeit ist wegen ihrer großen Dichtigkeit bemerkenswert. Ihre vollkommen glatten Innenflächen sichern die höchste Abflußmenge.

Eine andere sehr entwicklungsfähige Anwendungsmöglichkeit ist die Pilzdecke. Die Spannweite dieser Decken überschreitet heute kaum das 30- bis 40-fache ihrer Dicke. Sie kann mit meinen Verfahren, ohne daß der Preis je m² oder die Durchbiegung erhöht wird, reichlich verdoppelt werden, so daß die Pilzdecken, die gegenwärtig noch etwas selten sind, allgemeinere Anwendung, besonders in Wohnhäusern, finden können, deren Bau sie wesentlich vereinfachen würden.

Eisenbetonbalken großer Spannweite.

Ich habe in verschiedenen früheren Veröffentlichungen gezeigt, daß die Anwendung von Eisenbeton in Bogenform es gestattet, große Spannweiten zu erreichen, die nur von den Hängebrücken übertroffen werden können.

Es ist klar, daß die theoretischen Grenzspannweiten der Bogen durch die von mir vorher beschriebenen Verfahren noch beträchtlich erhöht werden

können. Das Erreichen einer fast augenblicklichen Erhärtung gestattet überdies auf dem Gebiet des Betons vollkommen neue Bauverfahren, von denen man bisher glauben konnte, daß sie dem Bau von Eisenkonstruktionen vorbehalten seien.

Ich werde dieses Thema, das an sich allein so umfangreich ist, daß es eine getrennte Arbeit notwendig macht, gesondert behandeln.

Hier will ich nur den geraden Balken besprechen.

Bisher war es unmöglich, eine wirtschaftliche Anwendung des Eisenbetons in Form von geraden Balken großer Spannweite, besonders bei Vollwandträgern von verhältnismäßig geringer Höhe, in Betracht zu ziehen.

Hierfür gibt es drei Gründe: Schlechte Ausnutzung des Betons auf Druck, Unmöglichkeit, der Bewehrung große Kräfte zuzuteilen, es sei denn unter Verwendung eines großen Eisenquerschnitts, der wieder eine schwere Betonhülle verlangt, vor allem aber sehr mittelmäßige Ausnutzung des Betons in den Teilen, die der Übertragung der Querkräfte dienen. Meine Verfahren bringen in diesen drei Richtungen bedeutende Verbesserungen.

Ich habe durch die Untersuchung von Sonderfällen festgestellt, daß die Anwendung dieser neuen Verfahren es gestattet, die wirtschaftlich ausführbaren Grenzspannweiten von Eisenbetonbalken mit 5 bis 10 zu multiplizieren. Vollwandträger von 100 m Spannweite werden zu niedrigem Preis und ohne Schwierigkeiten ausführbar. Sie werden, besonders im Falle mehrerer gleichartiger Träger, bedeutend leichter und wesentlich billiger als Stahlträger von gleicher Spannweite und gleicher Tragfähigkeit.

Ich habe bis zu den allerkleinsten Ausführungseinzelheiten für Träger von 100 m Spannweite, die eine doppelte Bedachung (Sägedach über einer durchsichtigen Decke) tragen sollen, einen Entwurf ausgearbeitet, der in seinen Gedankengängen der Ausführung in Le Havre gleicht.

Diese Untersuchung liefert nachstehende Ergebnisse:

Das Gewicht des Trägers ist je lfd/m 3200 kg. Er trägt mittels einer etwa 350 kg/m wiegenden Bewehrung aus 180 auf 84 kg gestreckten Stäben von 16 mm, die einer Dauerspannung von 50 kg/mm² unterworfen sind, sein Eigengewicht und eine Nutzlast, die seinem Gewicht gleicht. Die zulässige Betondruckspannung ist 180 kg; der Beton hat eine Druckfestigkeit von über 800 kg/cm². Ich habe vorgesehen, daß der Beton des Steges im Bedarfsfall durch senkrecht und waagerecht gespannte Bewehrungen einer doppelten Druckspannung unterworfen wird, die jede Möglichkeit der Rißbildung durch Schubspannungen ausschließt, für die als Höchstwert etwa 60 kg/cm² angenommen sind. Diese Schubspannungen sind unter diesen Bedingungen keine Zug- sondern Druckspanugen, deren Höchstwert wesentlich unter der angenommenen zulässigen Grenze von 180 kg/cm² liegt.

Ich will endlich noch einige Angaben über eine Anwendung meiner Verfahren zur Verbesserung der Betonstraßen geben.

Die Anwendung von Bewehrungen in den Straßendecken ist oft in der üblichen Form eher schädlich als nützlich, weil sie die Zugspannungen verstärken und dadurch die Zerstörung unter wechselnden Belastungen und die Bildung von Rissen begünstigen statt zu verhindern. Die Straßendecken werden indessen durch die Anwendung gespannter Bewehrungen in jeder Hinsicht bedeutend verbessert.

Zunächst ersetzen sie die Zugspannungen durch Druckspannungen. Dadurch werden die Rißbildungen verhindert, und die vielen Fugen überflüssig, denn die durch Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen verursachten Änderungen beeinflussen künftig nur noch die jeweilige Größe des mittleren Druckzustandes.

Zweitens wird der Widerstand des Betons gegen Reissen durch die Beseitigung der Zugspannungen bedeutend verbessert, die Formänderungsfähigkeit verringert und die Biegefestigkeit erhöht. Daraus ergibt sich ein gutes Verhalten unter starken Belastungen, auch im Fall von nachgiebigem Untergrund.

Der Eisenverbrauch würde sich bei Verwendung von Eisen mit einer Streckgrenze von 120 kg/mm^2 auf ungefähr 4—5 kg/m^2 stellen, der Selbstkostenpreis auf 5—6 Fr./m^2.

Die Erhöhung des Preises je m^2 würde von der gleichen Größenordnung wie eine Erhöhung der Dicke um einige cm sein. Die erzielte Verbesserung würde aber viel bedeutender sein als die, welche diese Erhöhung der Dicke bringen könnte. Die Straßen könnten schließlich den Straßenbenutzern zwei Stunden nach dem Einbringen des Betons übergeben werden.

Ich will die Aufzählung der möglichen Anwendungen nicht weiter verlängern. Ich glaube bewiesen zu haben, daß die systematische Anwendung der Hypothesen und der Verfahren der Physik es gestattet, bedeutsame und rasche Fortschritte in unseren allgemeinen Erkenntnissen auf dem Gebiete des Zements und des Betons zu machen und als Folge davon bedeutsame praktische Fortschritte.

Fortschritte, die mit denen vergleichbar sind, welche die gleichen Mittel den Industrien der Metallurgie und der Mechanik gebracht haben.

Zusammenfassung.

Von neuen Annahmen ausgehend erörtert der Verfasser die allgemeinen Eigenschaften der Zemente und die Bildung des Porennetzes der Zementpasten. Die Widerstandsfähigkeit der Zemente hängt mehr als von irgendeinem anderen Faktor von den mechanischen und physikalischen Bedingungen ihrer Anwendung ab. Durch einfache Verbesserungen der Dichtigkeit können für alle Zemente bedeutende, fast augenblickliche Erhärtungen erreicht werden.

Leere Seite
Blank page
Page vide