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

Band: 2 (1936)

Artikel: Umschnürung der Druckleitungen des Kraftwerkes in Marèges

Autor: Mary, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-2741

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: 15.12.2025

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

VI 6

Umschnürung der Druckleitungen des Kraftwerkes in Marèges.

Le frettage des conduites forcées de l'usine hydro-électrique de Maréges.

Reinforcement of Pressure Pipes for the Marèges Hydro-Electric Plant.

M. Mary,
Ingénieur des Ponts et Chaussées, Paris.

Am 5. Oktober 1935 weihte der Minister der öffentlichen Arbeiten den Staudamm des Kraftwerkes von Marèges ein, das die Eisenbahn Paris—Orleans mit Strom versorgen soll. Die Bauausführung geschah durch das Planungsamt (Service Spécial d'Aménagement) der Haute-Dordogne unter Leitung von Herrn *Coyne,* Ing. en Chef des Ponts et Chaussées.

Dieser Bau wurde vielfach in der Fachpresse beschrieben (vgl. bes. Génie Civil vom 7. VII. 34 und 26. X. 35). Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte dieser Arbeiten kurz zusammengefaßt.

Ein gewölbter Staudamm von 90 m Höhe und 247 m Kronenlänge wurde 18 km unterhalb von Bort-les-Orgues durch die Dordogne gebaut und dadurch ein künstlicher See von 230 ha Fläche geschaffen, von dessen 47 Mill. m^3 Wasser 35 Mill. nutzbar sind.

250 m unterhalb des Dammes wurde in einer Talweitung, die durch seitliche Wasserzuflüsse bedingt ist, die Kraftstation errichtet, die vier Einheiten mit senkrechter Achse für 34000 kw und 2 Hilfsmaschinen für 2300 kw umfaßt.

Hier soll nun im Einzelnen eine ganz neue Bauart auf einem Teilstück der Druckleitungen behandelt werden.

I. *Das Problem.*

Das Wasser wird vom Staudamm zur Kraftstation durch unterirdische Stollen geleitet. Von der Wasserfassung, deren Schwelle 35 m unter dem Normalspiegel liegt, gehen in schwachem Gefälle zwei Zuleitungsstollen von 6,20 m innerem Durchmesser und 135 m Länge aus. Jeder Stollen teilt sich in zwei ebenfalls unterirdische Druckleitungen von 4,40 m Innendurchmesser und einer Länge zwischen 120 und 150 m. Die Leitungen führen zum Werk und sind dort an die Turbinen durch metallische Verbindungen von 20 m Länge angeschlossen.

Die Fig. 1, 2a und 2b geben eine Übersicht der Anlage.

Die Zuleitungsstollen stehen höchstens unter 45 m innerem Wasserdruck. Sie laufen durch gewachsenen Fels. Man hielt es für überflüssig, die Verkleidung zu

armieren, die als Vollbeton ausgebildet ist und im Mittel in einer vollen Überzugsstärke von 35 cm mittels des Druckspritzverfahrens hergestellt wurde (Fig. 3). Eine Einspritzung sichert die Verbindung zwischen Beton und Fels und füllt die Hohlräume aus.

Am Fuß der Ausgleichsschächte wird der Druck größer wegen der Neigung der Stollen und der Wasserschläge, die durch plötzliches Schließen der Turbinen

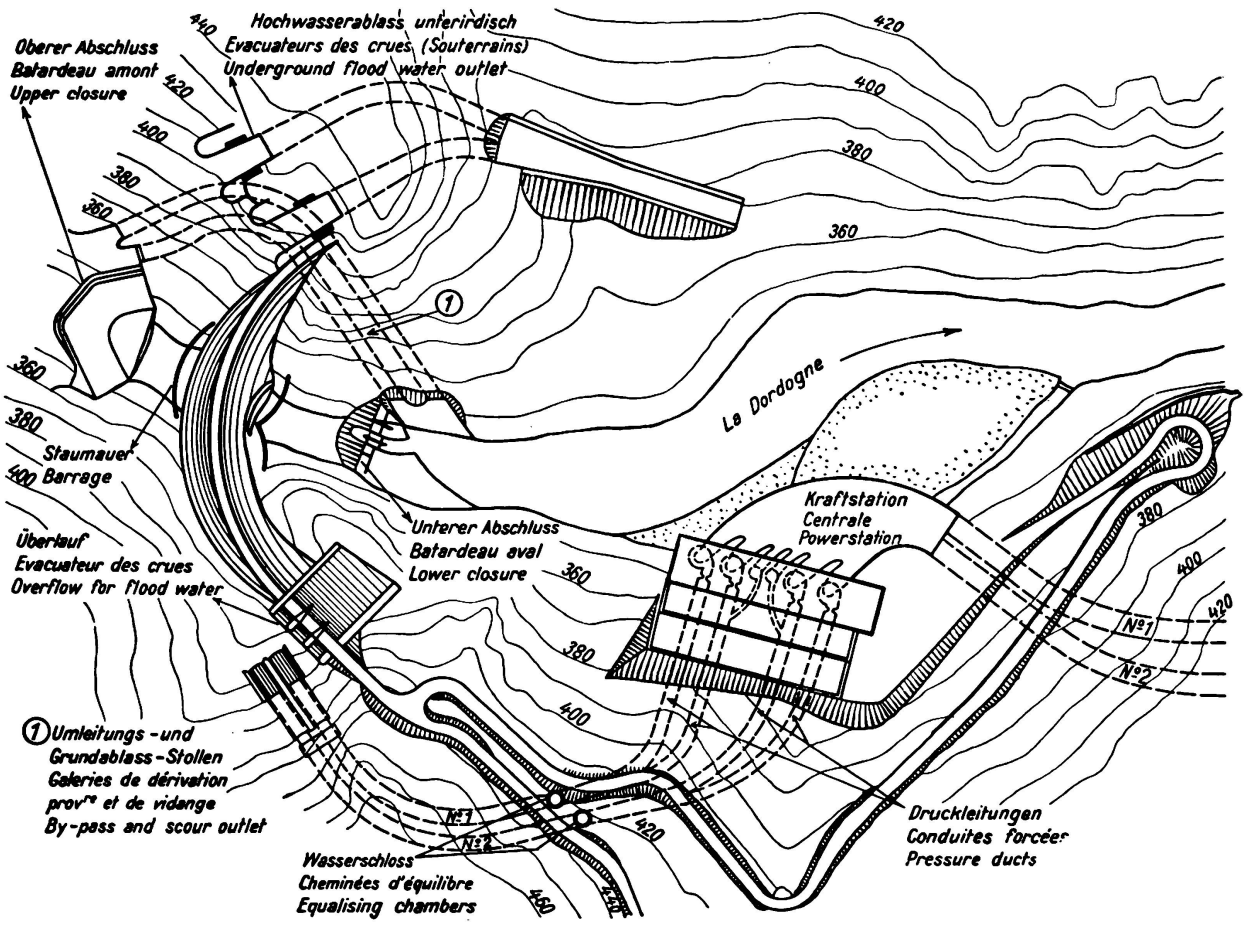
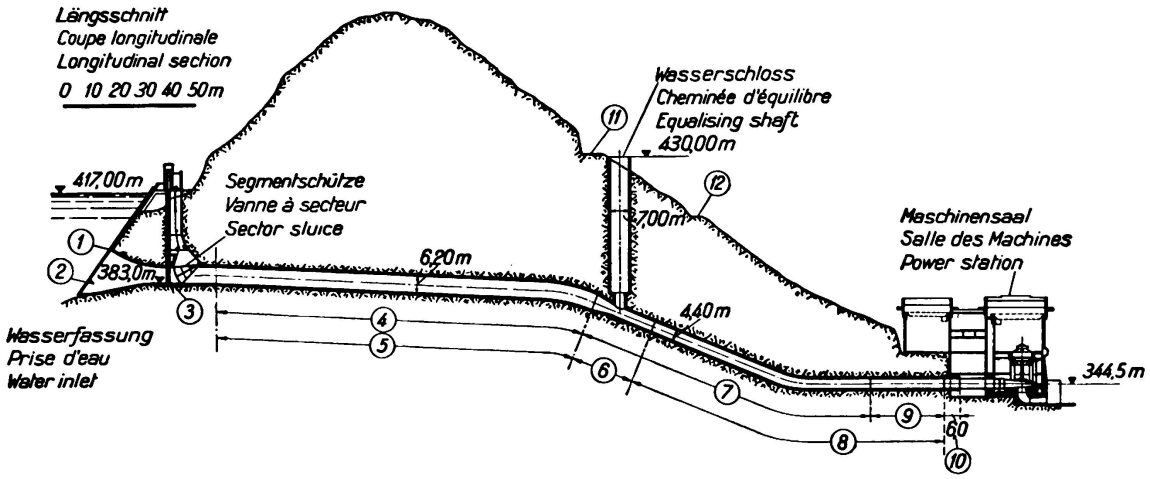


Fig. 1.
Staumauer. Übersichtsplan.

entstehen können. Der Druck kann unten 102,50 m erreichen, wovon 72,50 m statischer Druck sind und 30 m Erhöhung durch Stöße. In diesem Gebiet ist aber das Gestein von geringerer Güte. Die Verkleidung wurde deshalb hier in Eisenbeton hergestellt, und zwar von 35 cm gewöhnlichem Beton, der am Fels haftet, und einer Eisenbetonschicht (gunite armée, Fig. 4).

Die Mächtigkeit der Gesteinsdecke wurde für ausreichend erachtet, um für die Standfestigkeit der Arbeiten einbezogen werden zu können. Die Stahlringe im Beton wurden für sich auf Widerstand gegen Innendruck berechnet und zwar so, daß die Beanspruchung dicht an der Elastizitätsgrenze liegt. Wegen der durch Betonverkleidung und Felsdecke erhöhten Festigkeit des Baues ist die wirkliche Beanspruchung viel geringer; sie war schwer vorauszusagen, doch war man dessen sicher, daß die Elastizitätsgrenze nicht überschritten werden konnte. Auch

bei diesem Bau sicherte eine sorgfältige Einspritzung die vollständige Bindung zwischen Beton und Fels. An mehreren Stellen waren zur Prüfung der Eisenbeanspruchung im Betrieb Tönende Röhren System *Coyne* eingebaut. Am 15. Januar 1936 war das Beanspruchungsmaß etwa 2,5 kg/mm², während der herrschende Druck die Armaturen allein auf 10 kg/mm² beansprucht hätte.



Fig, 2a.

Kraftwerk von Marèges. Wasserfassung und Druckleitung No, 1.

1) Rechenputzstangen
2) Rechen
3) Abschluß
4) Gunit
5) Zuleitungsstellen
6) Abzweigung der Leitung 1 und 2
7) Armierter Gunit
8) Druckleitung No. 1
9) Umschnürte Zone
10) Verankerung der Leitung
11) Zugangsstraße zum Staudamm
12) Zugangsweg am Werk.

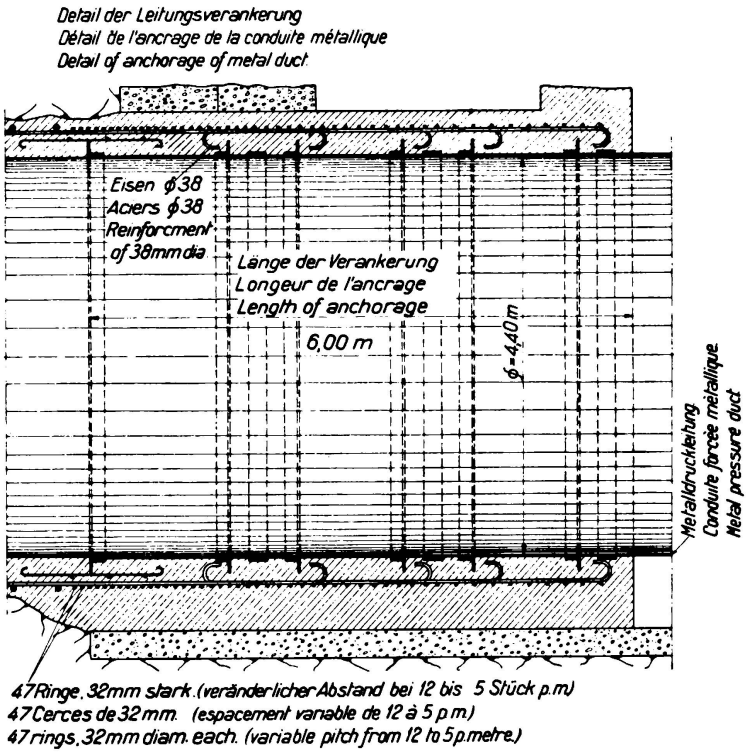


Fig. 2b.

Detail der Leitungsverankerung.

In den letzten 30 m, bevor die Stollen das Fundament des Werkes erreichen und an die Metalleitungen angeschlossen sind, wird mittelmäßiges Gestein durchfahren, und die Möglichkeit desselben sinkt auf 10 m. Hier ist auch der Wasserdruck am größten und kann einschl. der Schläge 102,50 m erreichen.

Die für den übrigen Verlauf der Leitung gewählte Bauart bot in dieser Zone keine genügende Sicherheit; für letztere war die Standfestigkeit der Felsdecke aus Sicherheitsgründen vernachlässigt, so daß sich das Problem der Leitung dem einer solchen in freier Luft näherte.

Unseres Wissens gibt es in Eisenbeton auch nicht entfernt in Bezug auf Durchmesser und Druck Leitungen mit Eigenschaften wie in diesem Fall. Die

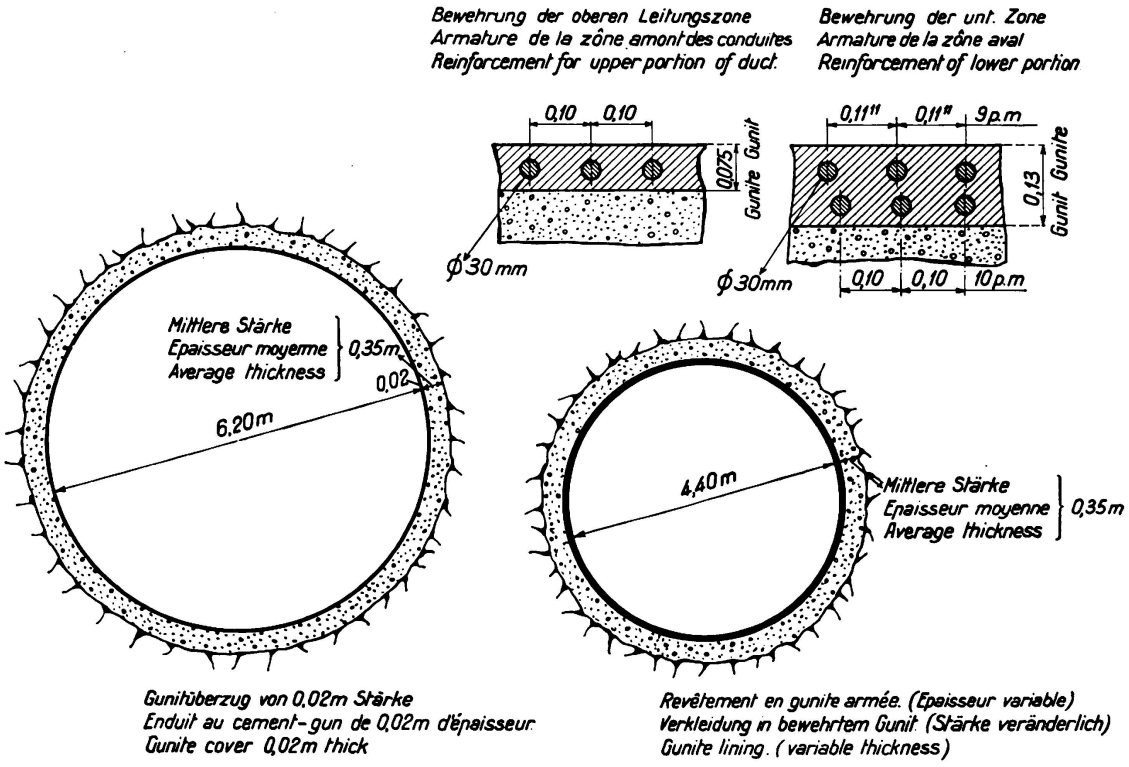


Fig. 3 und 4.

Querschnitt des Zuleitungsstollens.

Horizontalschnitt durch die Druckleitungen und Einzelteile der Bewehrung.

heutige Kenntnis der Eisenbetonleitungen führte die Ingenieure dazu, die beiden folgenden Grundregeln zu beachten: 1. Die Bewehrung muß ausreichend sein, um allein den Druck auszuhalten; 2. der Betonquerschnitt muß so groß sein, daß seine Dehnungsgrenze unter Berücksichtigung der Bewehrung nicht überschritten werden kann. Diese letzte Regel ist wichtig, denn eine Leitung wird durch Rißbildung praktisch unbrauchbar. Die Anwendung dieser beiden Regeln führt in unserem Fall zu einer Stahlabmessung von 200 cm² auf den laufenden Meter Leitung und einer Wandstärke von 1 m. Lassen sich nun die Grundregeln der Zugfestigkeit von Eisenbeton auf eine so starke Verkleidung anwenden? Das ist wenig wahrscheinlich. Trotz der Bedeutung und Kostspieligkeit der Bauten war es ungewiß, ob nicht schwere Rißbildungen die Anlage ge-

fährden und wichtige Instandsetzungen schon von Inbetriebnahme des Werkes an erforderlich machen würden.

Da man die Leitung in Eisenbeton verwarf, blieb als einzige klassische Lösung die Verlängerung der Metalleitung auf 30 m im Fels.

Zwei Möglichkeiten waren gegeben: die Leitung unter der Erdoberfläche in einem so weiten Stollen zu verlegen, daß man sie stets von außen kontrollieren konnte; hier wäre ein riesiger Aushub erforderlich geworden mit der Verpflichtung, ihn zu verkleiden um Felsablösungen zu verhindern. Die zweite, klassischere Art wäre, den Zwischenraum zwischen Leitung und Fels mit Beton auszufüllen — eine unbequeme und teure Arbeit. In beiden Fällen hätten die Anlagekosten beträchtliche Werte erreicht. Wirtschaftliche Erwägungen führten zu einer anderen Lösung: Eine gewöhnliche Betonleitung wurde durch Stahlseile umschnürt.

II. *Vorarbeiten — Forschungen und Versuche.*

Eine der größten Schwierigkeiten bot die unterirdische Umschnürung. Schon vom Beginn der Arbeiten an nahm man an, daß diese nach Fig. 5 durchgeführt werden müsse. Die Stollen sollten in ganzer Länge ausgeschachtet und die Kabel in kreisförmigen Rohren gegen die Felswand gelegt werden. Dann würde die Leitung an den Fels betoniert, und die Rohre in den Beton eingebettet. Nach genügender Erhärtung sollte das Kabel gespannt und verkeilt werden; darauf wäre das Rohr mit Zement zu füllen, um das Metall zu schützen; eine Einspritzung zwischen Beton und Felswand erhöhte die Sicherheit durch das Zusammenarbeiten derselben.

Die Hauptschwierigkeit bestand darin, die Befestigungsart der Kabel für ihre Spannwirkung zu bestimmen.

Der erste Plan (Fig. 6) bestand in einem seitlichen Stollen, der ein Ende des Kabels zugänglich ließ, während das andere im Beton eingebettet war. Aber bei dieser Anordnung verringert sich die Kabelspannung von dem Ende an, das den Beanspruchungen durch die Pressen unterworfen ist, bis zum anderen Ende infolge der Reibung des Kabels an der Umhüllung.

Schon vorher wollte man den Reibungskoeffizienten zwischen Kabel und Eisenblech experimentell bestimmen und Stoffe ausfindig machen, die die Reibung möglichst herabsetzen. Wir konnten den Koeffizienten nicht unter 0,10 bis 0,15 senken. Bei einer Annahme von 0,15 würde das befestigte Ende nur den Anteil $\frac{1}{e^{2\pi \cdot 0,15}} = 0,385$, also ein Drittel der durch die Pressen am anderen Ende ausgeübten Spannung erhalten. Eine derartige Ungleichheit der Spannung bedingt in der Leitung noch keine rißbildenden Biegungen. Die Drucklinie weicht doch nur um geringe Beträge von der Mittellinie ab. Trotzdem aber folgt daraus, daß das Kabel schlecht ausgenutzt ist. Um dies zu bessern, müßte man wenigstens die beiden Kabelenden freilassen und beide den Wirkungen der Pressen aussetzen, was die Länge der reibenden Oberfläche auf den halben Umfang verringern würde. Das Verhältnis der äußersten Spannungen des Kabels würde dann noch $\frac{1}{e^{\pi \cdot 0,15}} = 0,62$ betragen, was eine Verminderung um 38 % bedeutet.

Es muß möglich sein, in dieser Richtung bei Verwendung von Graphit als Schmiermittel noch weiter zu gehen; wir haben aber diese Versuche nicht weiter verfolgt. Damals gab uns Herr *Guerrier,* Ingenieur der Firma Léon Ballot, eine

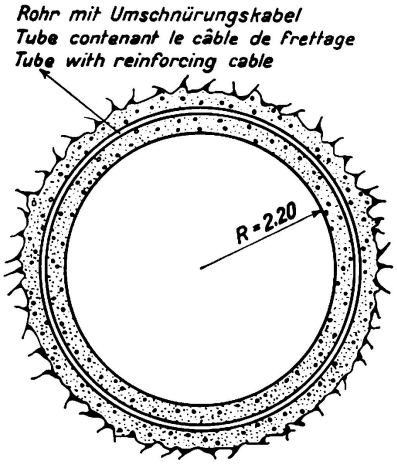


Fig. 5.

Schematischer Schnitt einer umschnürten Leitung.

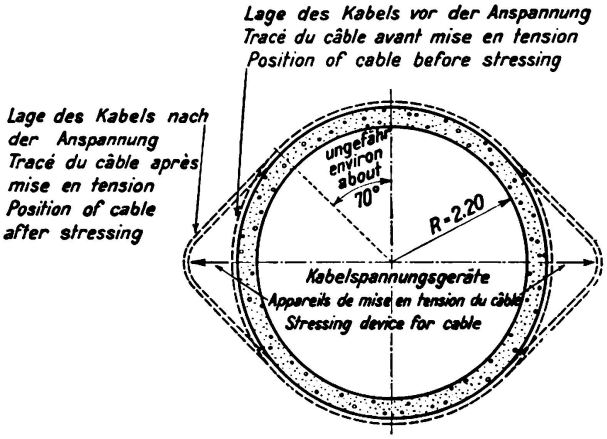


Fig. 7.

Zweiter schematischer Entwurf der Umschnürung.

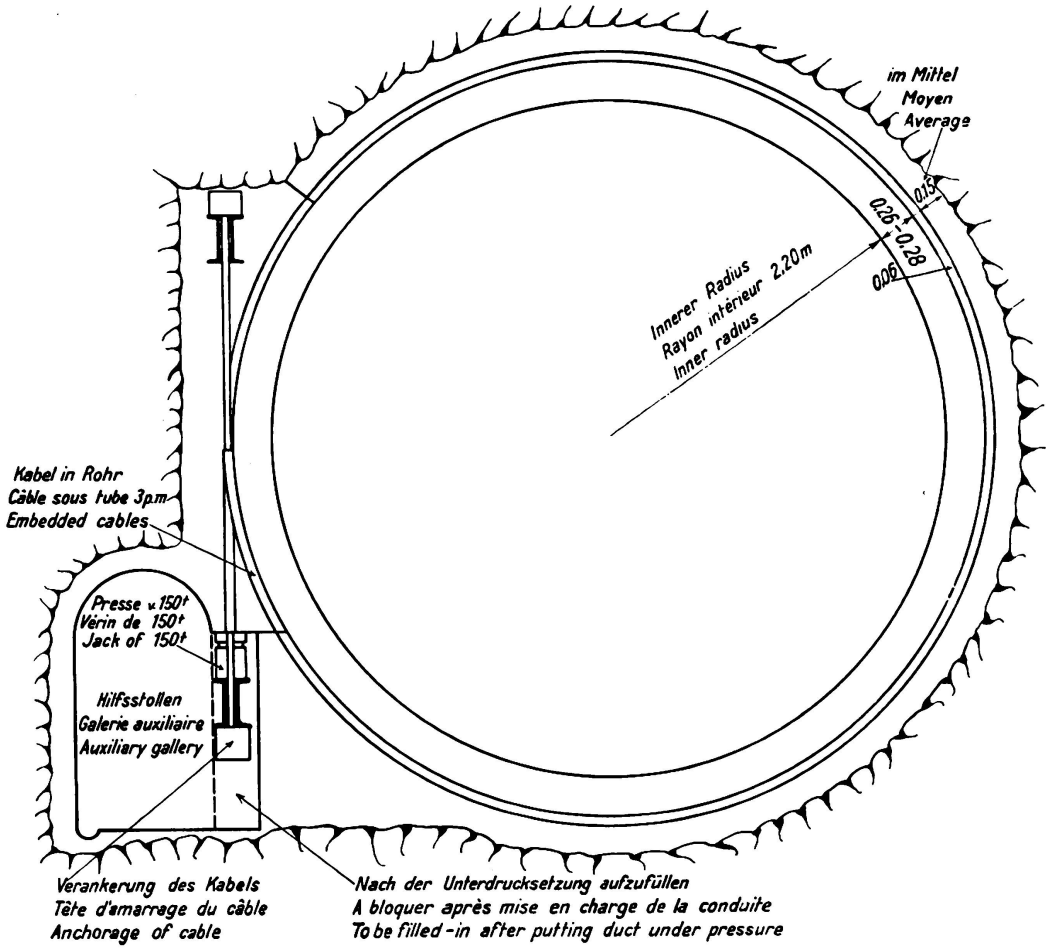


Fig. 6.

Projekt der Umschnürung einer unterirdischen Druckleitung durch Anspannung von Stahlkabeln.

besonders interessante Anregung, die für die Ausführung der Umschnürung eine sehr praktische Form ermöglichte, wobei die Reibung nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt. Herr *Guerrier* schlug uns vor, das Kabel so zu spannen, daß sein Verlauf wie in Fig. 7 verändert wurde. Diese Anordnung erlaubt es, die Pressen in das Innere der Leitung zu verlegen und die Hilfsstollen zu entbehren. Die Reibungswirkung des Kabels auf die Hülle wird auf einen Teil des Umfangs mit einem Zentriwinkel von etwa 70° beschränkt.

Die Anordnung könnte sehr einfach sein, wenn man die beiden Pressen (Fig. 8) gegeneinander stützen könnte. Aber das Kabel liegt nur teilweise auf der Oberfläche auf und verursacht deshalb die Ausbildung einer Eiform. Die Drucklinie entfernt sich beträchtlich von der Mittellinie. Um das zu vermeiden, hätte man

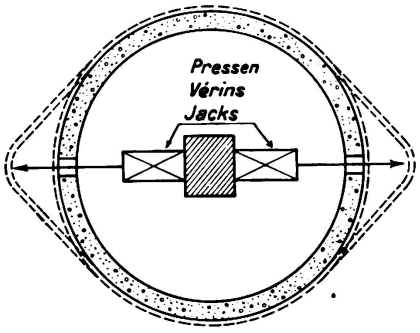


Fig. 8.
Schema.

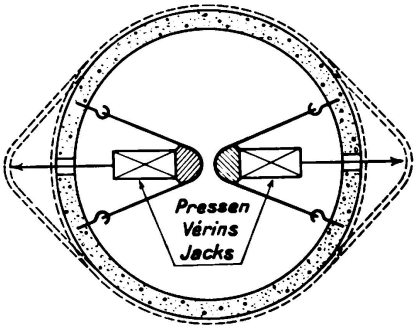


Fig. 9.
Angewendetes System.

an die Anbringung von Zugbändern denken können, deren Spannung in jedem Moment der Arbeit hätte genau geregelt werden können. Diese Bedingung ist äußerst schwer zu erfüllen und schien praktisch nicht durchführbar. Man zog deshalb vor, die Pressen voneinander unabhängig zu lassen, wobei jede auf die Leitung selbst mit Hilfe von Kabeln abgestützt wurde (Fig. 9).

Nach dieser Entscheidung ergab sich die Umschnürung nach Fig. 10. Das Rohr zum Schutz des Kabels besitzt an den Enden des wagrechten Durchmessers zwei Ausweitungen in Form eines flachen Kastens, damit das gespannte Kabel bei Anspannung ausweichen kann. Unten sind die beiden Kabelenden mit zwei Schuhen aus Gußstahl versehen, die im Beton eingebettet sind und sich dadurch gegenseitig abstützen. Beim Durchgang durch die seitlichen Kästen wird das Kabel von den im Innern der Leitung gelegenen Pressen mittels besonderer Mundstücke zugänglich. Die Pressen wirken auf das Kabel durch Stempel aus Gußstahl (Pilze genannt), die in den Kästen liegen und in der Verformungszone dem Kabel eine ausreichende Krümmung geben sollen, damit nicht die Drähte durch Biegung reißen. Die Pressen ruhen in der Leitung auf Ankereisen, die die Kästen einfassen. Alle diese Anordnungen werden unten näher beschrieben.

Die Ausführung ist in vieler Hinsicht recht kühn, so daß man sie nicht im großen durchführen durfte, ohne durch Versuche beruhigende Feststellungen gewonnen zu haben.

Die Stärke und Dichte des Materials um jedes Kabel soll in höchstem Maße deren Zahl auf den laufenden Meter der Leitung herabsetzen. Verschiedene Bedingungen führten zu deren Beschränkung auf zwei; jedes Kabel sollte auf

mindestens 110 Tonnen gespannt werden. Wie würde sich aber eine Leitung in Beton gegen örtliche so hohe Beanspruchungen verhalten? Allein der Versuch konnte Aufschluß geben.

Andererseits bewies die Theorie, daß trotz der örtlichen Beanspruchungen, die sich aus der Wirkung der Kabel auf nur zwei Punkte des Umfanges ergeben, die

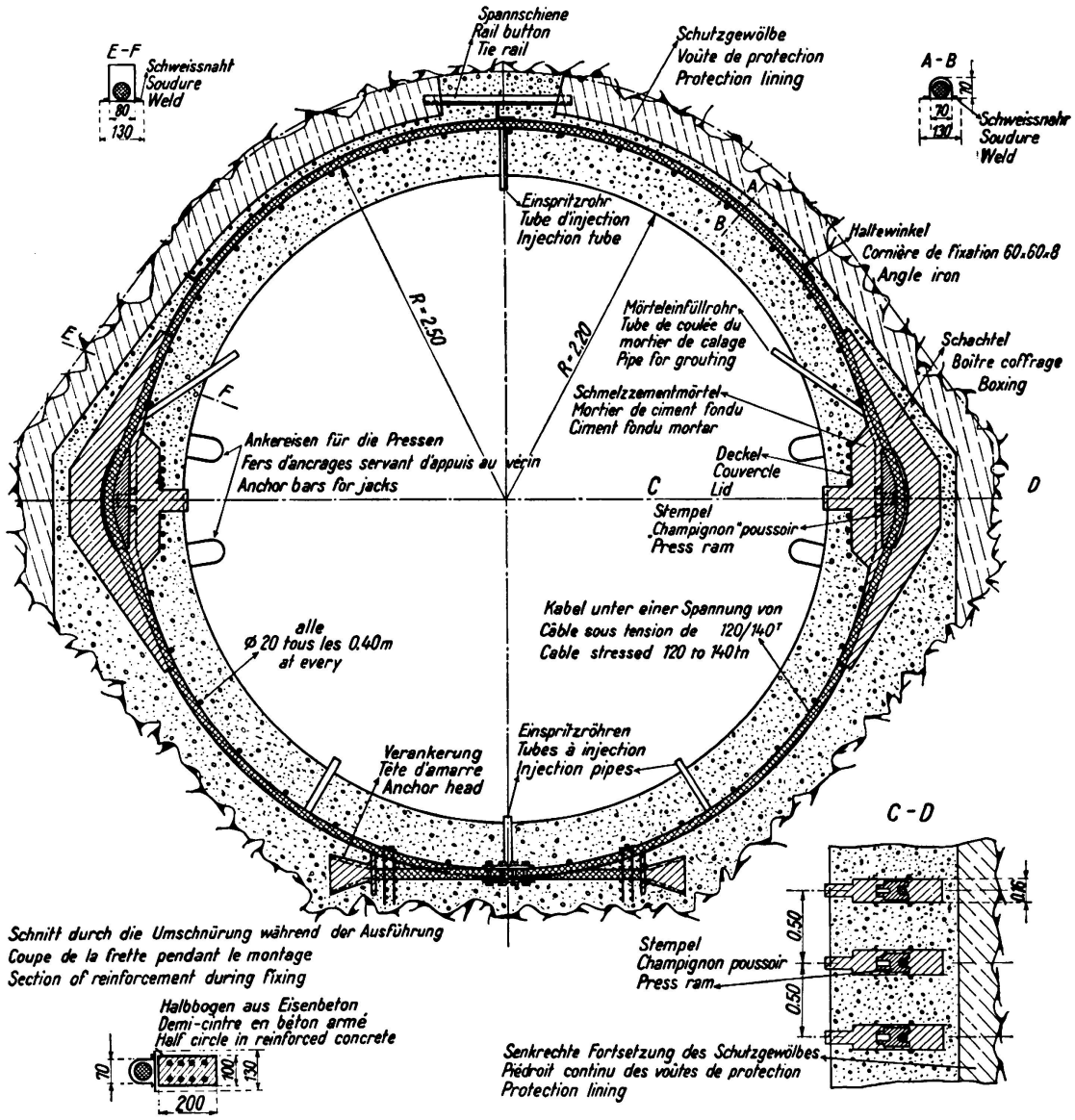


Fig. 10.

Druckleitungen. Umschnürter Teil. Schnitt durch eine Umschnürung.

Drucklinie sehr nahe der Mittellinie liegen würde. Das erforderte aber den experimentellen Beweis.

Ebenfalls konnte nur ein Versuch zeigen, wie sich der Beton unter dem ungeheuren örtlichen Druck durch das Kabel verhalten würde und wie dieses sich darin einschneiden würde.

Man beschloß, einen Versuch in wahrer Größe mit einem senkrechten Zylinder von 4,40 m ∅ und 25 cm Dicke (sehr wenig armiert) zu machen.

Die wichtigsten Folgerungen sind:

1. Es wurde nur ein einziger Riß beobachtet, als die Spannung des Kabels 125 t erreichte; es war ein ringförmiger Riß im Innern der Leitung ganz entlang dem Kabel. Dieser Riß beruht auf Längsbiegung der Wand (Fig. 11). Aus den Versuchsbedingungen folgert man, daß man dann, wenn die Kabelspannung über 125 t steigen soll, davon absehen muß, ein einzelnes Kabel zu spannen; mehrere benachbarte Kabel sind gleichzeitig anzuspannen. Man sieht übrigens sofort, daß bei einem zur Vermeidung der Rißbildung z. B. auf 120 t gespannten Kabel die Zugkräfte, die diese Rißbildung bedingen, im Maß der Spannungszunahme der benachbarten Kabel abnehmen. Deshalb besteht bei Beendigung der Umschnürung der Leitung keine Gefahr mehr, daß nachher eine Rißbildung auftreten wird. Man kann übrigens anfügen, daß dieser Biegungsriß zwar für die Leitung nicht schwerwiegend ist, wir ihn aber doch vermeiden wollten.

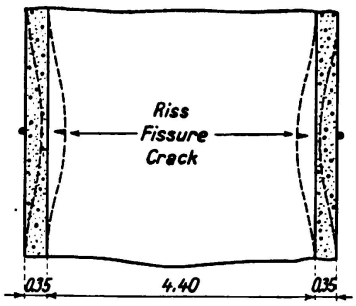


Fig. 11.
Längsverschiebung einer örtlich umschnürten Leitung.

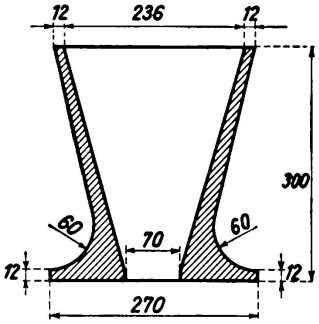


Fig. 12.
Schnitt durch einen Ankerschuh.

2. Die Spannung des Kabels wurde bis auf 156 t erhöht, doch zeigte sich kein weiterer Riß, vor allem kein Längsriß. Solche Risse wären sicher aufgetreten, wenn die Drucklinie aus dem Kern des Querschnitts herausgetreten wäre.

3. Die an der Oberfläche verteilten Meßgeräte (Tönende Rohre nach *Coyne*) zeigten, daß sich in der Längsrichtung die Beanspruchung des Betons auf eine Länge von 1 m beidseits des Kabels verteilte, obwohl die Wandstärke nur 0,25 m betrug. Dieses Ergebnis gewährte völlige Beruhigung über den endgültigen Plan, der Kabel im Abstand von 0,50 m auf eine Mindeststärke der Wandung von 0,40 m vorsah; man war dessen von vornherein sicher, daß trotz der Zusammenfassung der Umschnürung in einer kleinen Zahl stark gespannter Kabel die Druckbeanspruchung des Betons praktisch gleichmäßig sein würde.

4. Endlich konnte man feststellen, daß das Kabel und seine Umhüllung keinen merkbaren Eindruck auf der Betonoberfläche hinterließen. Da die Versuche völlig gelungen waren, beschloß man, auf 28,50 m Länge des unteren Teils jeder Druckleitung, also auf insgesamt 114 m, dieses Verfahren anzuwenden. Andere Versuche wurden gleichzeitig ausgeführt, um gewisse Einzelheiten zu bestimmen.

Als eine der ersten Fragen war zu klären, wie das Kabel wirtschaftlich an den Enden zu befestigen sei. Einmal war von vornherein möglich, die beiden Enden im Beton der Leitung selbst einzubetten, indem man auf die Haftung als Ver-

ankerung rechnete. In diesem Fall war notwendig, das Kabel vollständig auf eine gewisse Länge an den beiden Enden auseinanderzudrehen, denn man kann nicht mit der Haftung eines Kabels oder von Litzen rechnen, zumal eine Zugbeanspruchung eine fühlbare Verringerung des Querschnitts verursacht. Aber diese unzähligen Drähte, die einer in den anderen verwickelt sind, hätten die Betonierung der Leitung erschwert. Man hat es für richtiger gehalten, das Kabel mit solchen Schuhen zu versehen, wie sie bei Hängebrücken üblich sind. Die Versuche zeigten, daß 30 kg schwere Schuhe aus Gußstahl (Fig. 12) völlig ausreichten, um einen Zug von über 220 t auszuhalten. Es wurde weder ein Bruch des Halters noch eine Loslösung der Drähte beobachtet. Das Kabel riß immer bei seiner normalen Bruchlast; fast nie riß es an der Austrittstelle aus dem Schuh, obwohl diese Stelle durch die Biegung der Drähte etwas schwach erschien. Fügen wir noch hinzu, daß an Stelle der Gußmetallfüllung, wie es bei Hängebrücken üblich ist, Zementmörtel verwendet wurde; das Ergebnis war gut. Wir hatten auch Kabelschuhe ganz aus Eisenbeton hergestellt, aber unsere Wahl fiel endgültig auf die Stahlschuhe.

Ein anderes wichtiges Problem war noch die Befestigung der Kabel nach der Anspannung und zwar zwischen dem Stempel und dem Deckel des flachen Kastens, um die Pressen freizugeben. Es war unmöglich, dazwischen vorher ein Werkstück einzuführen; man konnte nur eine flüssige Masse eingießen, die später erstarrte, und zwar in kurzer Zeit zu solcher Festigkeit, daß sie einen Druck von mehr als 100 kg/cm² auszuhalten vermochte. Nach einigen vergeblichen Versuchen der Befestigung mit trockenem Sand, fiel unsere Wahl schließlich auf Schmelzzementmörtel, der voll befriedigte. 6—7 Stunden nach dem Einguß konnte man die Pressen ohne Gefahr wegnehmen. Der so in einen völlig geschlossenen überall umschnürten Kasten gegossene Zement, erlitt nur eine geringfügige Zusammendrückung beim Abnehmen der Pressen (weniger als 1 mm; die Verformung des Kabels bei der Anspannung ist etwa 13 cm).

Außerdem wurden Versuche angestellt, um die elastische Verlängerung der Kabel und ihre bleibende Dehnung im Hinblick auf die Berechnung der Tiefe der flachen Kästen zu bestimmen. Die Versuche zeigten uns, daß man auf eine fast elastische Deformation rechnen konnte; der Elastizitätsmodul war etwa die Hälfte von dem des Stahles.

Schließlich seien noch die Versuche über die Kriechfestigkeit des Kabels erwähnt, die uns zeigten, daß diese Verluste keine beträchtlichen Werte erreichen konnten. Wir haben einfach die Spannung auf 135 t anstatt der notwendigen 110 t gesteigert.

III. *Die Einzelheiten der Anordnung.*

In diesem Abschnitt geben wir die Einzelheiten der Ausführung und kurz die Begründung der Anordnung.

1. *Kabel.* Wie im Schlußabsatz des vorigen Kapitels gesagt, wurden die Kabel auf 135 t gespannt. Deswegen wurden Seile mit einer Zugfestigkeit von 220 t verwendet. Diese Beanspruchung nahe der Elastizitätsgrenze kann im Vergleich zu anderen Bauten als hoch bezeichnet werden. In Wirklichkeit regelt man im Augenblick der Anspannung des Kabels die Spannung auf einen genau bekannten

Wert. Der Versuch der Umschnürung eines senkrechten Zylinders hat uns gezeigt, daß das Kabel in keinem Punkt Biegungen zeigte, die seine Bruchlast herabsetzen konnten. Man kann doch nicht annehmen, daß die wahre Betriebsbeanspruchung größer als die der berechneten ist und man einen außerordentlichen Sicherheitswert ansetzen müßte. In den Augenblicken, die der Anspannung und der Befestigung folgen, kann die Zugkraft nur zur Verminderung neigen. Bei einmal ausgeführter Befestigung erleidet das verdichtete Betonrohr und das Kabel, die zusammenarbeiten, unter der Wirkung des inneren Wasserdruckes gleiche Verlängerungen, die aber sehr klein sind: der statische Druck erhöht die Spannung des Kabels um schätzungsweise 3 t, dazu kommt der Wasserschlag mit einer Erhöhung von 1 t, die zunehmend in etwa 4 Sekunden während des Schaufelschlusses wirkt. Das sind die Wirkungen, die zum Anfangszug von 135 t hinzukommen, welche die einzigen wenig bekannten Kräfte darstellen und für die man über einen sehr großen Sicherheitskoeffizienten verfügt.

Die Kabel bestehen aus 6 Litzen von 19 blanken Drähten von 4,15 mm ∅ und 130 kg/mm² Bruchfestigkeit.

2. *Verankerungsschuhe.* Fig. 12 (vgl. Kap. II) zeigt klar die gewählte Lösung.

3. *Rohre und flache Kästen.* Der Kabelschutz umfaßt drei Rohrstücke und zwei Flachkästen. Zur Erleichterung der Ausführung wurden, wie unten näher beschrieben wird, die Rohrstücke in zwei Teilen hergestellt. Eine Halbröhre mit Ω-Querschnitt wurde durch eine Platte abgeschlossen. Erstere ist nach einem Radius von 2,50 m gekrümmt.

Die flachen Kästen sollen die Verformung des Kabels aufnehmen und sind entsprechend Fig. 13 hergestellt. Sie bestehen aus dem eigentlichen Kasten und

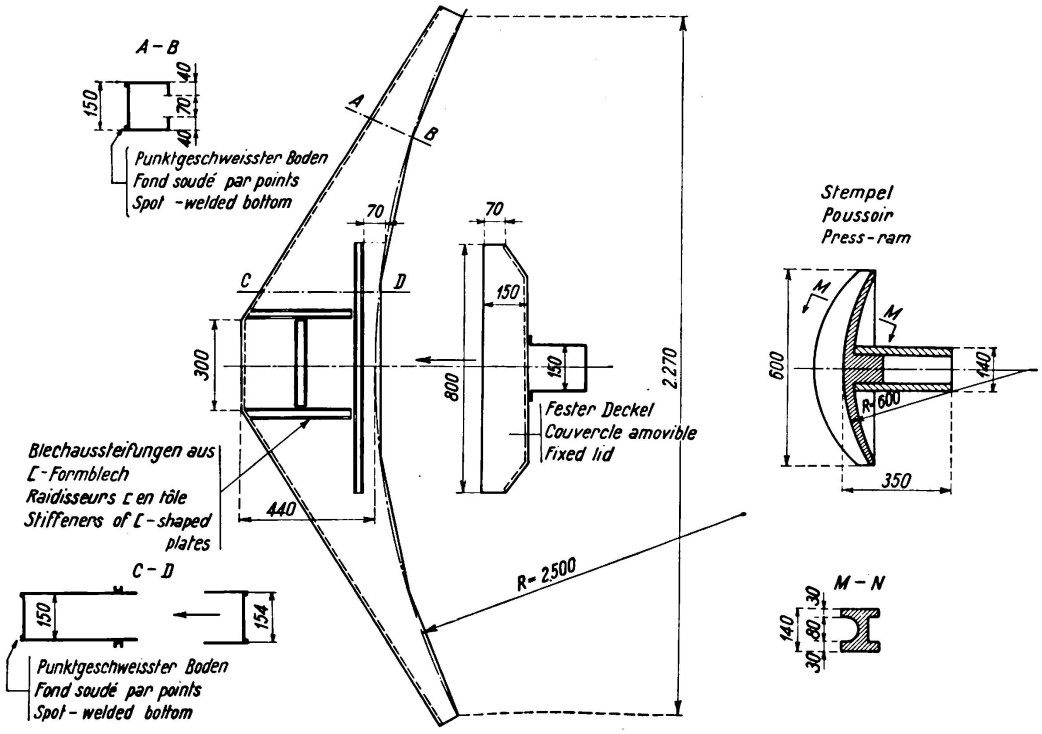


Fig. 13.

Druckleitungen. Stahlkasten für die Ausführung der Umschnürung.

dem Deckel, durch dessen kurzes Rohrmundstück das Kabel nach dem Betonieren zugänglich ist.

4. *Stempel.* Der Gußstempel (Fig. 14) ruht im Kasten; durch ihn wirkt die Presse auf das Kabel; er soll ihm eine zulässige Krümmung geben. Der Gußmörtel zwischen Stempel und Kastendeckel verspannt das Kabel und gestattet das Anheben der Pressen.

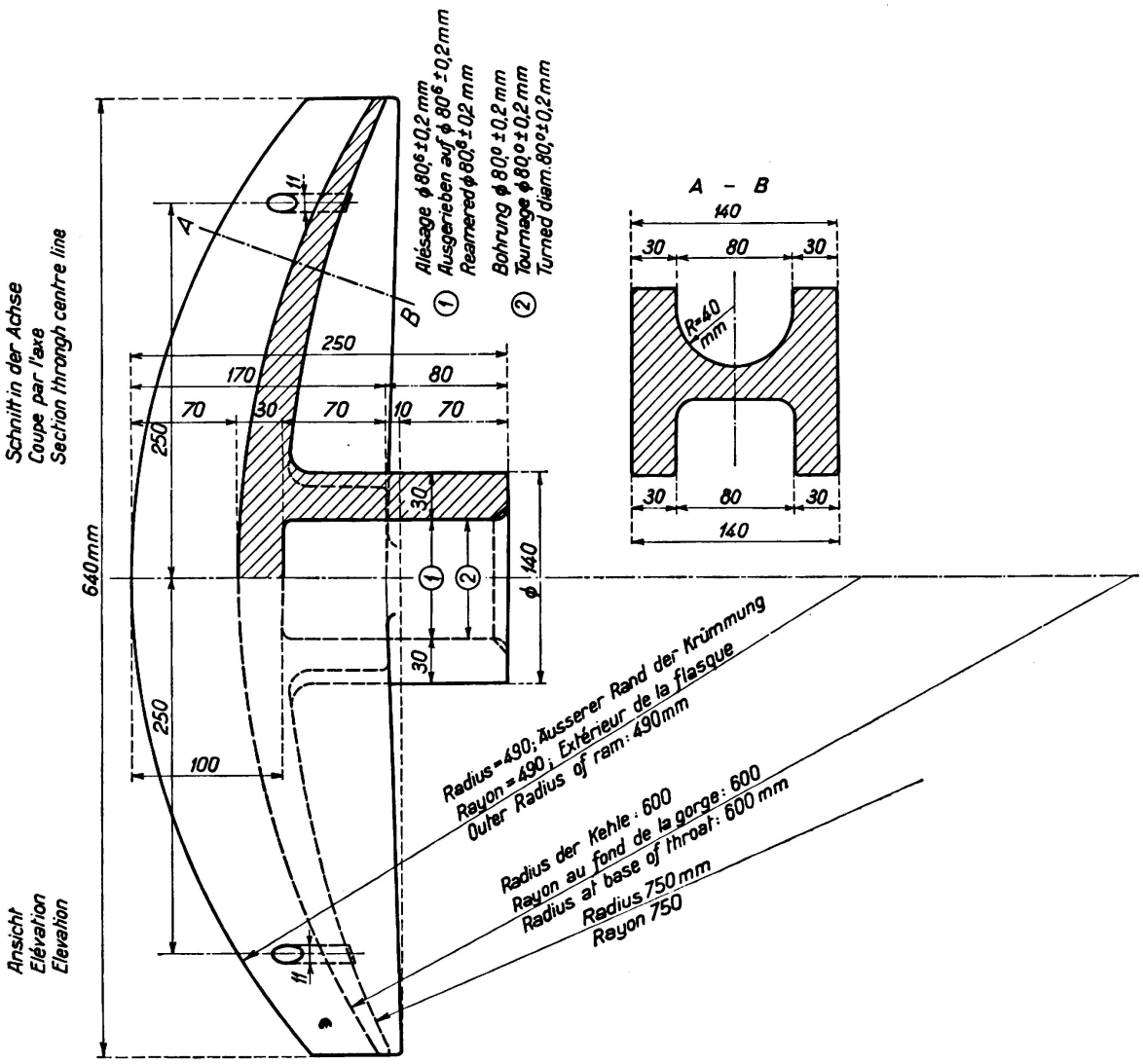


Fig. 14.
Umschnürung der Druckleitungen. Stempel.

5. *Bewehrungen.* Es waren keine ringförmigen Eisen vorgesehen. Einige Rundeisen von 20 mm ∅ im Abstand von 40 cm bilden eine sehr leichte Längsbewehrung, die wir übrigens für überflüssig halten, da die Längsverteilung der Beanspruchungen für jeden Ringteil bekannt ist. Diese Längsbewehrung ist am untersten Ende der umschnürten Strecke durch die Verankerungseisen der Leitungen beträchtlich verstärkt worden.

Die wichtigsten Eisenteile sind diejenigen für die Verankerung der Pressen sowie für die ständige Reaktion des Kabels, die über die Flachkästen gerade auf die geringe Zwischenschicht im Beton ausgeübt wird.

Fig. 15, auf der noch die längs angebrachten Eisen von 38 mm ∅ dargestellt sind, die die Verankerung der Metalleitung bilden, zeigt die gewählte Anordnung.

Zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Kabeln lassen zwei Bügel von 28 mm, deren Flächen parallel und 7 cm voneinander entfernt sind, aus dem Innern des Stollens zwei Haken von 15 cm ∅ 0,325 m über und unter der wagerechten Achse der Leitung herausstehen. Die Presse, die das Kabel unter Spannung setzt, kann sich somit auf 4 doppelte Haken stützen, von denen jeder eine Zugbeanspruchung von 30 t bei normaler Arbeit aushalten muß.

Die Eisen, die den Druck des Stempels auf den Zwischenbeton von 100—120 t nach der Anspannung auf die ganze Stärke der Leitung verteilen müssen, sind wagerecht angeordnet und stellen durch ihre regelmäßige Krümmung mit großem Radius eine Umschnürung dieser Zwischenschicht dar.

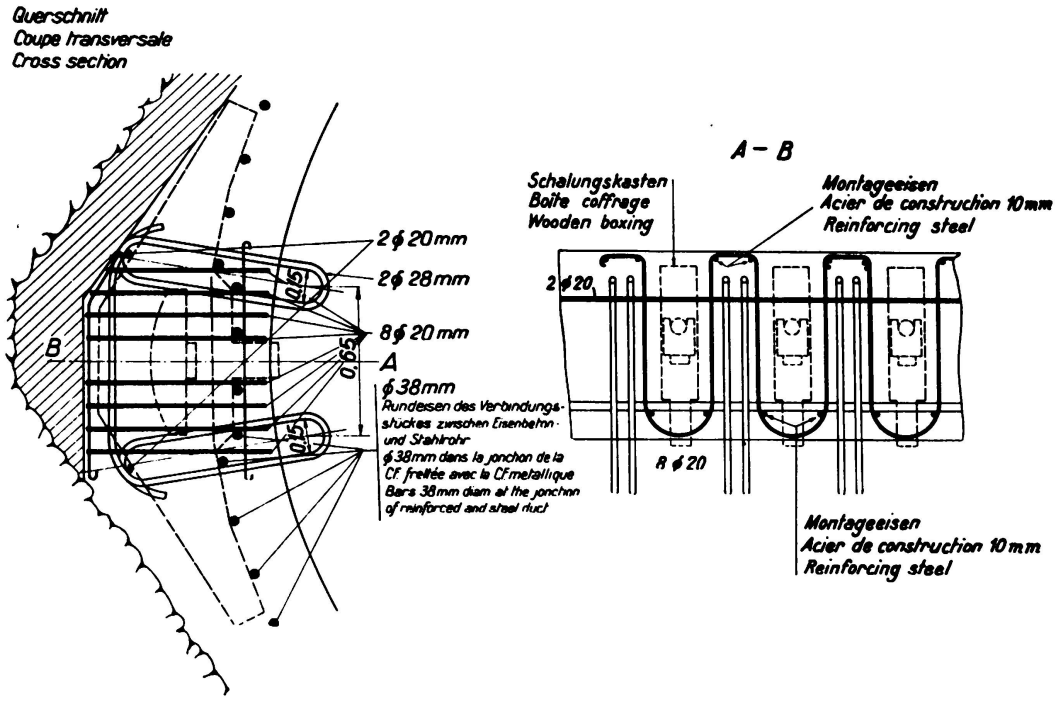


Fig. 15.

Druckleitungen. Umschnürte Zone. Bewehrung bei den Stempeln.

Schließlich bildet vor jedem Verankerungsschuh der Kabelenden ein doppeltes 8 mm starkes Eisengitter mit Maschen von 6 cm eine Bewehrung des Betons, der dort stark zusammengedrückt wird (Fig. 10).

6. *Pressenwagen.* Die Pressen ruhen auf einem Wagen, der auf provisorischer Bahn läuft. Ein Wagen trägt zwei Pressen, der andere vier (Fig. 16).

Jede Presse ruht auf einem Metallträger, der vom Wagen getragen wird, ist aber in seinen Bewegungen ihm gegenüber mit einem Spielraum von 10—15 mm in jeder Richtung frei. Durch den Tragbalken gehen zwei Spindeln von 110 mm mit Mutter auf jeder Seite der Presse, auf gleicher Höhe und in 25 cm Abstand von derselben. Bei jeder Spindel führt ein Kabel mit Endhaken über eine Rolle, das mittels Bolzen, Unterlagsscheibe und Splint an den in § 5 beschriebenen Ankerhaken befestigt werden kann.

In der Ruhestellung werden die Pressen von einer Richtschraube gehalten, so daß sie schnell auf die Achse der Kabelöffnung eingestellt werden können. In der Betriebsstellung ruhen sie auf den Verankerungen, und der Spielraum, über den der Träger verfügt, schützt den Wagen vor den entstehenden Beanspruchungen.

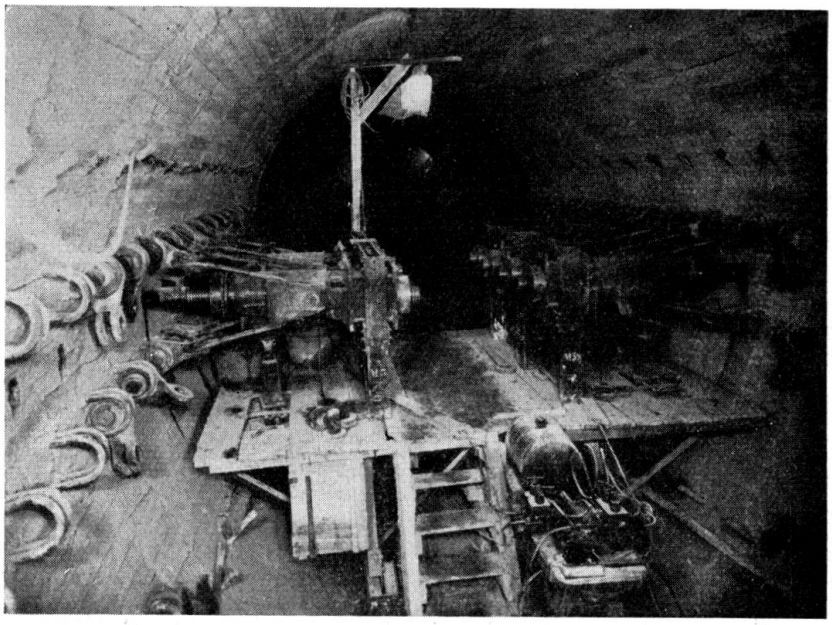


Fig. 16.
Fahrbarer Pressenstand.

IV. *Die Ausführung der Umschnürung.*

1. *Die Vorbereitung der Kabel.* Die Kabel wurden in einer Länge von 18,50 m geliefert; jede Länge reicht aus, um einen Ring zu bilden. Sie sind auf 32 cm an jedem Ende umwickelt. Man zieht auf jedes Ende einen Ankerschuh; dann wird das Kabel zu Einzeldrähten aufgedreht, so daß sie in Haken endigen; der so gebildete Zopf wird mit Schmelzzementmörtel im Schuh befestigt; die Zement-

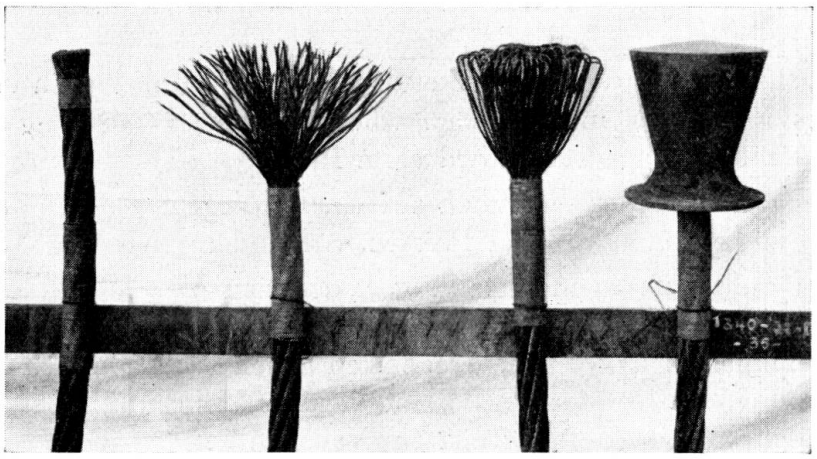


Fig. 17.
Herstellung der Seilanker.

mischung ist 50 kg auf 50 kg Sand von 0—5 mm. Fig. 17 zeigt den Arbeitsvorgang.

2. *Vorbereitung der Ringe.* Herr *Pfaff,* Ingénieur des Travaux Publics de l'Etat, der die Umschnürung durchführte, hatte den Gedanken, die Ringe vor dem Transport in den Boden starr zusammenzusetzen, während die Verbindung von Kabel, Hülle und Kästen an Ort und Stelle sehr schwierig gewesen wäre.

Er baute draußen einen Werkboden aus zwei beweglichen Halbbögen in Schmelzzement-Eisenbeton mit einem äußeren Radius von 2,50 m und stellte sie wagrecht 1 m über dem Boden auf (Fig. 18).

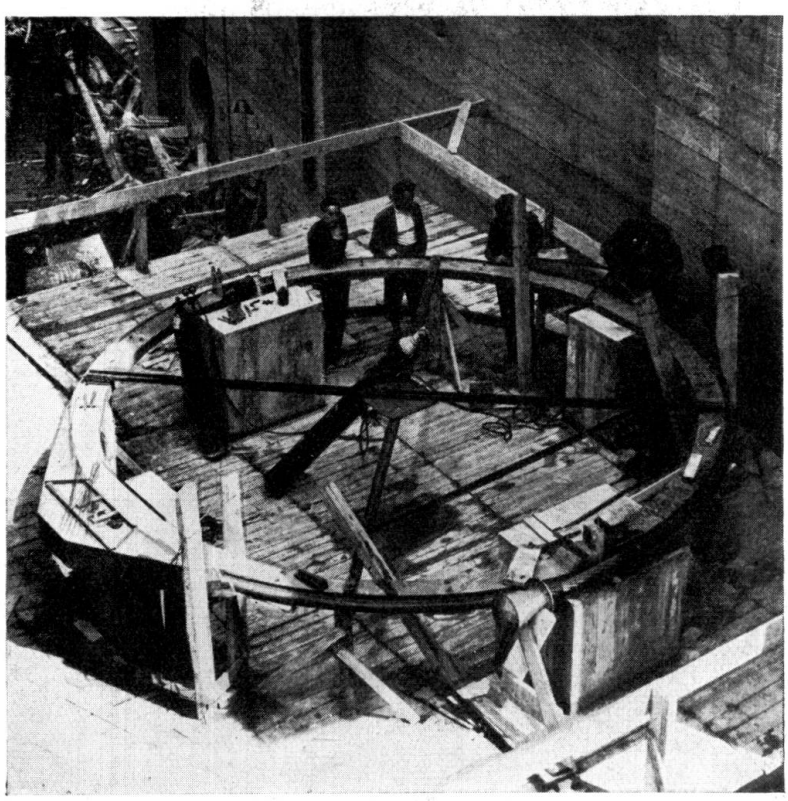


Fig. 18.
Herstellung der Umschnürung.

Das Kabel wird zuerst um die Rundform gewickelt und vorläufig auf Keile gesetzt. Dann werden zwischen Kabel und Form die drei Einheiten der Schließplatten der Hüllen gesteckt, dann werden die Kabelenden bei ihrem Zusammentreffen mit einer Zangenpresse verbunden; durch zwei Pressen zwischen den Enden der Halbformen wird dann das Kabel leicht gespannt und ihm genau der Durchmesser von 5 m gegeben. Endlich werden die Ω-Hüllen und die Kästen ohne die Deckel angebracht und mit Punktschweißung an der Schließplatte befestigt.

Die Vorbereitung eines Reifens erforderte mindestens drei Stunden. Die aufgetretene Abweichung des Durchmessers betrug nur wenige Millimeter.

3. *Anbringung der Ringe.* Die so gebildete starre Form wiegt etwa 600 kg; sie soll nun unterirdisch aufgestellt werden, wo der lichte Raum kaum größer ist. Sie wird mit einem Derrick-Kran herangeführt und auf zwei seitlichen

Schienen weitergebracht (Fig. 19). Dann beginnt das Ausrichten und Befestigen der Ringe an im Fels sitzenden Winkeln, um spätere Verlagerungen zu verhindern (Fig. 20).

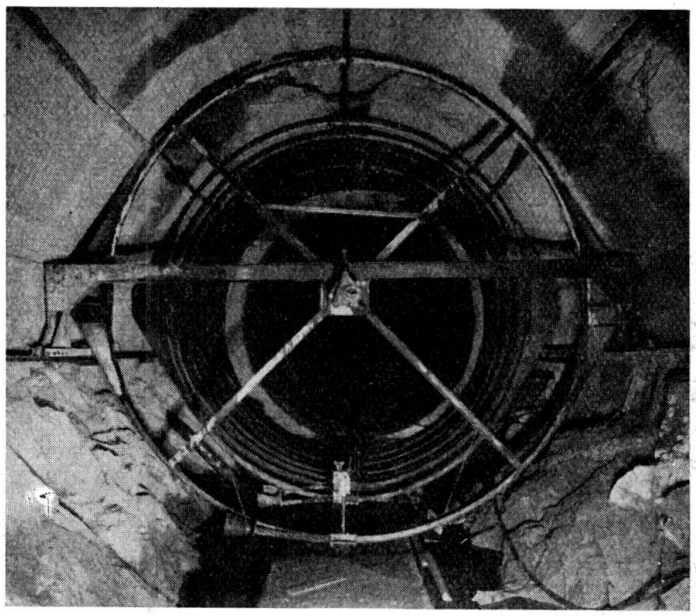


Fig. 19.
Verlegen der Umschnürungen.

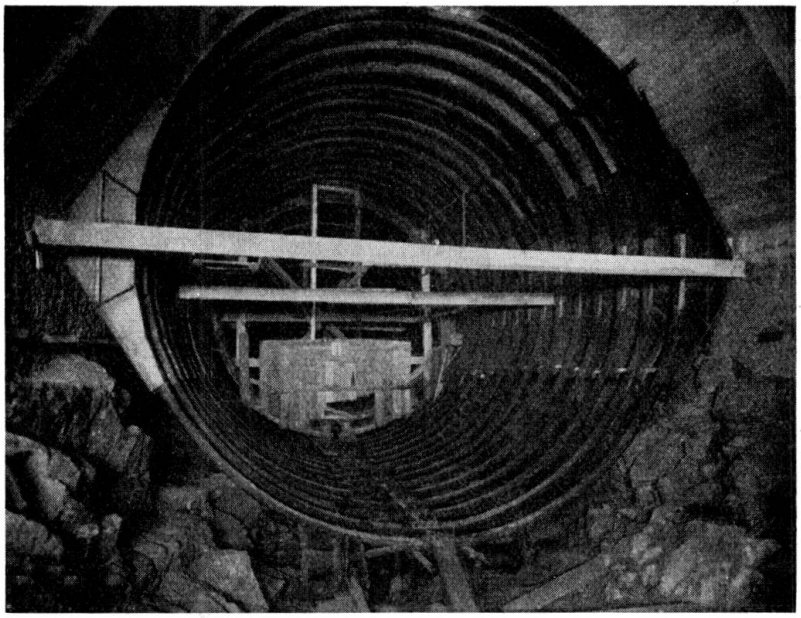


Fig. 20.
Ansicht der Umschnürungen nach erfolgter Verlegung.

4. *Einbau.* Man betoniert zuerst die Unterseite der Leitung, dann bringt man die Stempel, die Kastendeckel und die Bewehrung an. Die Fig. 21 und 22 zeigen die Leitung nach dieser Arbeit. Dann kommt die Betonierung selbst mit Steinschlagbeton (70 mm, in den bewehrten Teilen unter 30 mm) mit 400 kg Eisenportlandzement auf den m^3.

5. *Spannung und Befestigung der Ringe.* Nach vierzehntägiger Erhärtung des Betons beginnt man die Reifen zu spannen (Fig. 16). Der Pressenwagen wird vor das Kabel gezogen. Jede Presse wird gegen das Mundstück des Kastendeckels gerichtet. Eine Stoßspindel wird zwischen Stempel und Presse gebracht und

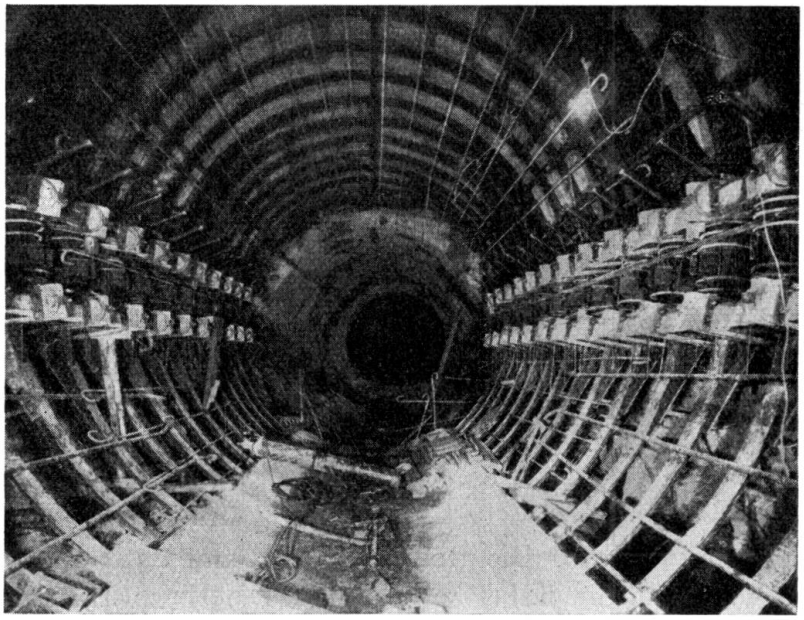


Fig. 21.
Ansicht des Stollens vor dem Betonieren.

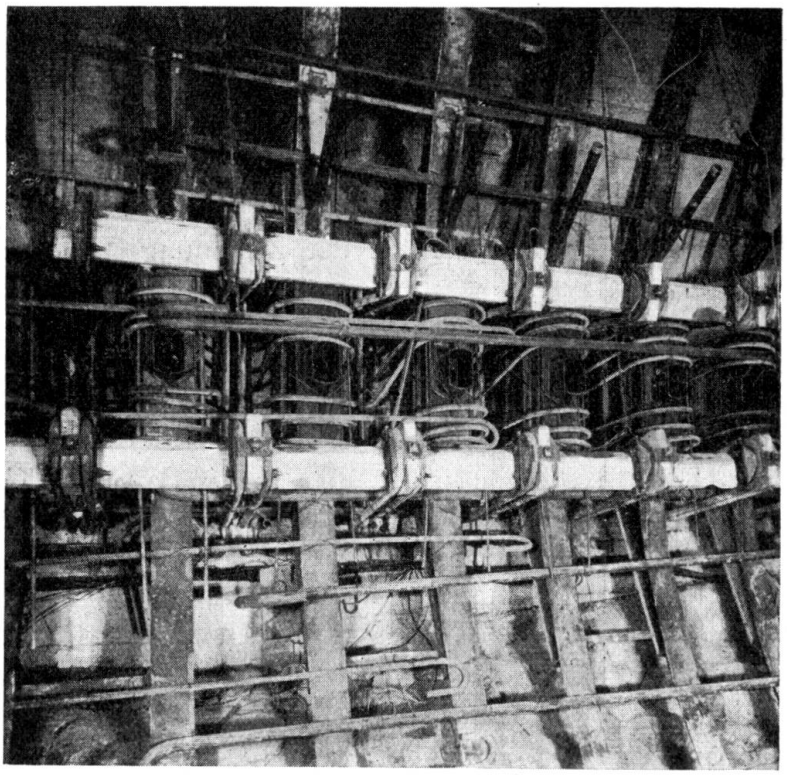


Fig. 22.
Preß-Stempel Gehäuse und Bewehrung vor dem Betonieren.

diese in der richtigen Lage verkeilt. Die seitlichen Ringe werden an die Verankerungshaken gehängt und mittels der Schraubenmuttern der Spindeln leicht gespannt.

Die Presse wird durch Öl in Betrieb gesetzt, indem man eine kleine elektrische Pumpe arbeiten läßt, die gleichzeitig auf die zwei gegenüberliegenden Kolben wirkt. Eine Meßtafel gibt ständig die Spannungswerte im Kabel als Funktion des durch die Pressen erzeugten Druckes und der am Kabel ausgeübten Verformung an, die durch die Senkung des Stempels gemessen werden. Sobald der Zug 130 t erreicht, stellt man die Pressen auf ihrer Sicherungsschraube fest und füllt die flachen Kästen mit Zementmörtel (1 : 3), den man durch eine kleine Röhre durch den oberen Teil des Kastens einfließen läßt. Nach 7 Stunden ist der Mörtel fest genug, um die etwa 100 t betragende Kraft des Kabels aufzunehmen. Man hebt dann vorsichtig die Pressen ab und nimmt das nächste Kabel vor. Wir setzen hinzu, daß die Verschiebung des Pilzes etwa 13 cm und der Rückgang nur etwa 1 mm ist, was einem sehr kleinen Spannungsverlust des Kabels entspricht.

Der gesamte Vorgang des Spannens überschreitet keine 12 Stunden, was in fortlaufender Arbeit an einem Tage das Spannen von zwei Kabeln mit einem Paar Pressen gestattet.

6. *Vollendung der Leitung.* Die Rohre werden dann durch Einspritzung mit Zement ausgekleidet, um die Kabel zu schützen. Die Einspritzung erstreckt sich auch auf die Verbindung zwischen Fels und Beton und die Spalten. Dann werden die Verankerungshaken abgetrennt und die Leitung innen mit der Zementspritze überzogen.

V. *Nachprüfung der Umschnürung. Überwachung im Betrieb.*

In der Betonschicht werden in ausreichender Zahl Tönende Röhren nach *Coyne* angeordnet, um die Druckverhältnisse der Verkleidung zu prüfen und um sich beim Betrieb über die Erhaltung dieses Zustandes zu versichern.

Fig. 23a zeigt beispielsweise die Betonverdichtung zwischen den Kabeln 11 und 12 der Leitung Nr. 1. Man kann in der Zeichnung drei Perioden unterscheiden:

1. Periode der Anspannung der Kabel in der Nähe der untersuchten Zone (27. 10. bis 8. 11. 34). Die Kurve zeigt klar die Änderung der Betondruckspannung, als man nacheinander die Spannung der fünf Kabel Nr. 9, 10, 11, 12, 13 neben dem untersuchten Punkt vornahm.

Diese Angaben beweisen völlig das, was man in den Vorversuchen festgestellt hatte, d. h., daß sich der Wirkungsbereich eines Kabels mehr als 1 m weit auf jede Seite erstreckt, was die gleichmäßige Verdichtung des Betons trotz der nennenswerten Entfernung der Ringe beweist: am Ende dieser Periode erreicht die Verformung 500 Mikron auf den Meter. Wenn man für den frischen Beton den Elastizitätsmodul zu etwa 150000 kg/cm^2 annimmt, ergibt dies eine Beanspruchung von 75 kg/cm^2.

2. Die Periode langsamer Verformung (vom 8. 11. 34 bis 14. 6. 35): Der Beton verformt sich weiter unter dem fortgesetzten Einfluß der Lasten, die auf ihn wirken. Die plastische Verformung überschreitet 100 Mikron auf den Meter.

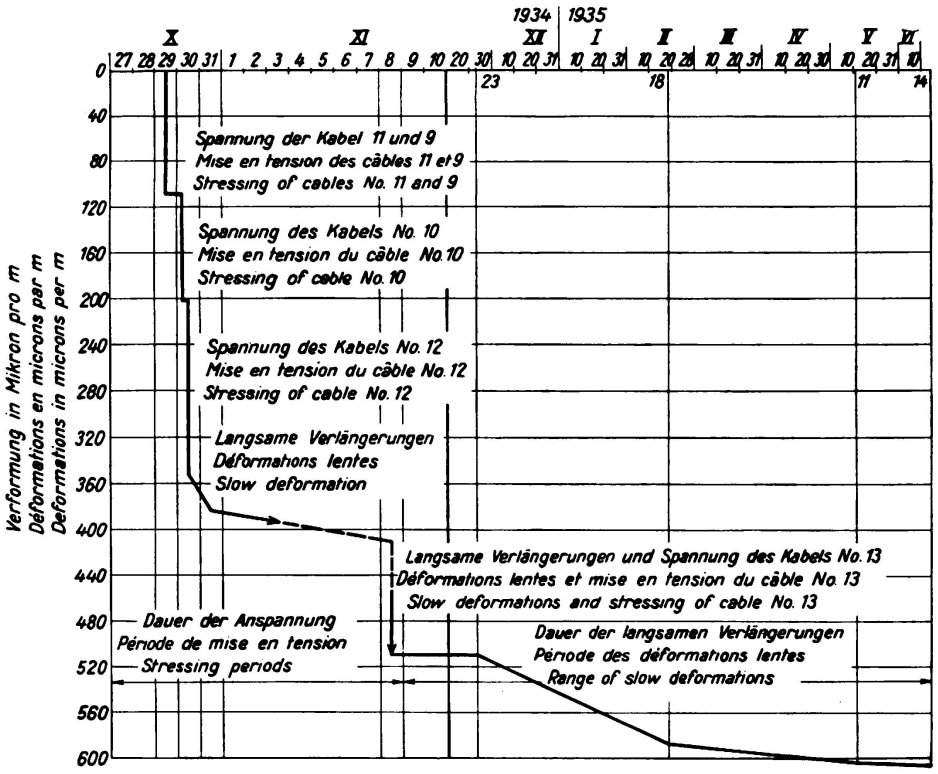


Fig. 23a.

Erster Abschnitt. Anspannung der Kabel 9 bis 13 (vom 29. X. bis 8. XI. 1934) und langsame Verlängerungen (bis 14. VI. 1935).

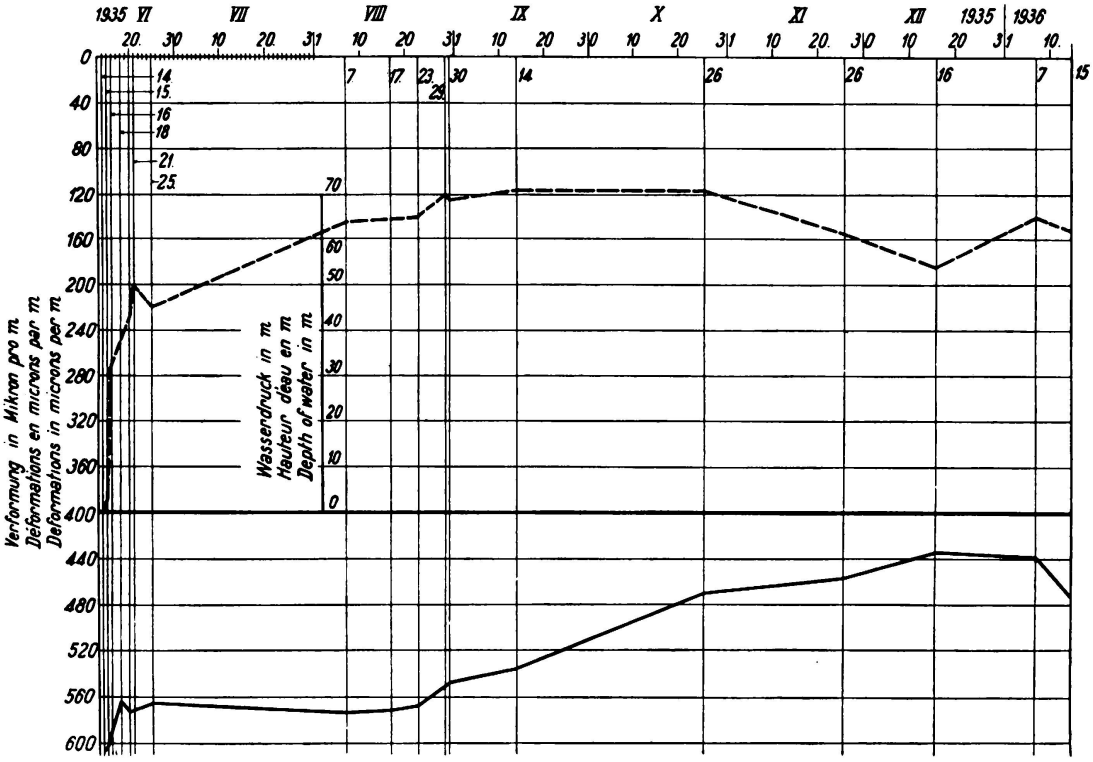


Fig. 23b.

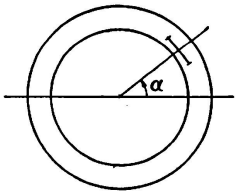
Zweiter Abschnitt. Unterdrucksetzung der Leitung.
Darstellung der Verformung der Leitung No. 1 (gemessen mit Tönenden Rohren).

3. Periode der Wasserfüllung (vom 14. 6. 35 ab). Unter dem Einfluß des inneren Druckes entspannt sich der Beton teilweise. Bei einem Wasserdruck von 71 m erreicht die Entlastung 135 Mikron/Meter. Wäre die Leitung frei und würde der Fels keine Rolle für die Festigkeit der Anlage spielen, würde die Entspannung ungefähr 300 Mikron erreichen.

An Fig. 23b kann man feststellen, daß zwischen der Änderung der Werte der Betonbeanspruchung und der des Wasserdruckes eine sehr befriedigende Übereinstimmung besteht. Die kleinen Unregelmäßigkeiten der Kurve kommen gewiß meist von Temperaturschwankungen des Wassers her, die geringe Fehler bei der Auswertung der Tönenden Rohre verursachen.

Prüft man jetzt die Werte der Verdichtung und Entspannung der verschiedenen untersuchten Stellen, so stellt man unter Berücksichtigung der verschiedenen Dicke eine ausreichende Übereinstimmung der Ergebnisse fest, die in der folgenden Tabelle zusammengestellt sind:

Nummer des Apparates	Nummer der Kabel neben dem Apparat	Lage des Apparates im Querschnitt α	Verdichtungswert nach Umschnürung	Verbleibender Verdichtungswert mit Wasserdruck 71 m	Bemerkungen
1	2	3	4	5	6
1	0—1	α = 60°	300	170	Zu 3. Bedeutung von α
3	7—8	α = 90°	580	440	
4	11	α = 135°	465	360	
10	11—12	α = 120°	530	420	
11	11—12	α = 60°	605	470	
13	12—13	α = 0°	450	220	
14	14—15	α = 90°	270	170	
18	38—39	α = 90°	470	345	



Zusammenfassung.

Die hier beschriebene Umschnürung ist eine neue Anwendung der allgemeinen Methode, am Bauwerk Vorspannungen aufzubringen, um späteren Beanspruchungen besser zu widerstehen. Die erfolgreiche Anwendung dieser Methode durch *Freyssinet* und *Coyne* ist bekannt.

Besondere Schwierigkeiten traten bei der unterirdischen Ausführung auf. Die Bauart würde weit verwendungsfähiger unter den viel einfacheren Verhältnissen der Umschnürung von Betonleitungen im Freien sein. Wir glauben, daß es eine Methode ist, die besonders bei Leitungen großen Querschnitts viel angewendet werden kann.