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

Band: 2 (1936)

Artikel: Die Gewölbe der Tranebergsbrücke in Stockholm

Autor: Kasarnowsky, S.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-2721

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: 07.08.2025

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

IVb 4

Die Gewölbe der Tranebergsbrücke in Stockholm.

Les voûtes du pont de Traneberg à Stockholm.

The Arches of the Traneberg Bridge in Stockholm.

S. Kasarnowsky,
Ingenieur, Erster Konstrukteur der Brückenbauabteilung der Hafenverwaltung, Stockholm.

Die in den Jahren 1932—34 erbaute kombinierte Straßen- und Vorortsbahnbrücke über den Tranebergsund in Stockholm hat eine Hauptspannweite von 181 m und ist somit heute die weitestgespannte Betonbrücke der Welt (Fig. 1).

Von Dr. Ing. *Dischinger* wurde vorgeschlagen, als Kühnheitsgrad einer Bogenbrücke den Krümmungsradius einer durch die Kämpfer und den Scheitel gezogenen Parabel $\frac{l^2}{8f}$ (l = Spannweite; f = Pfeilhöhe) zu bezeichnen.

Noch besser wäre es, als Kühnheitsgrad den wirklichen Krümmungsradius im Gewölbescheitel einzuführen, da dieser mit dem Raumgewicht des Gewölbematerials multipliziert angenähert die Normalspannung im Scheitel für das Eigengewicht des Gewölbes gibt. Für die Tranebergsbrücke ist bei einer Pfeilhöhe von 26,2 m dieser Krümmungsradius 183 m, also um ca. 7 m größer als bei der neuen Moselbrücke in Koblenz und um ca. 50 m größer als bei der Plougastelbrücke bei Brest.

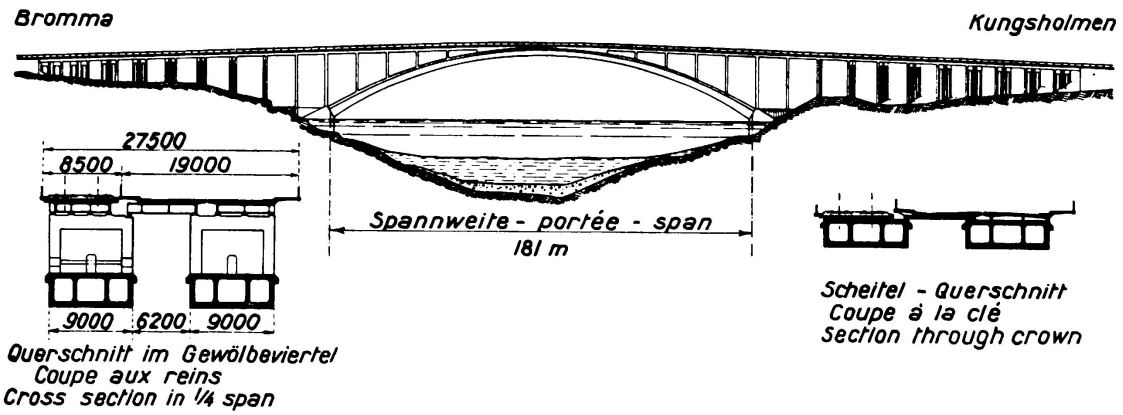


Fig. 1.

Die Brückenbahn.

Die Brücke besitzt zwei voneinanderr vollständig getrennte Brückenbahnen. Die eine dient dem Straßenverkehr und hat eine Breite von 19 m, verteilt auf eine Fahrbahn von 12,0 m, zwei Fußwege von 2,5 resp. 2,0 m und zwei Rad-

fahrwegen von je 1,25 m. Die andere Fahrbahn von einer Breite von 8,5 m enthält eine zweigeleisige normalspurige Vorortsbahn mit einem Geleiseabstand von 3,5 m.

Für die Wahl der Fahrbahnkonstruktion war der Gesichtspunkt maßgebend, das Gewicht möglichst niedrig zu halten, um die Gewölbe nicht unnötig zu belasten. Die Fahrbahntafel besteht aus 10 geschweißten Längsträgern und einer Eisenbetonplatte von 22 cm Stärke. Die Spannweite der Träger sowohl auf den Anschlußviadukten wie auf den Gewölben beträgt 13 m.

Belastungsannahmen.

Verkehrslast: Fuß- und Fahrradwege 0,4 t/m², Straßenfahrbahn 4 Belastungsstreifen nach Fig. 2a.
Vorortsbahn 2 Züge nach Fig. 2b.
Für ein Gewölbe ergeben diese Belastungen zusammen einen Belastungsgleichwert von 7,5 t/m.

Winddruck: 0,125 t/m²; *Temperatur:* ± 16° C.

Schwinden: entsprechend — 10° C.

Fig. 2a.

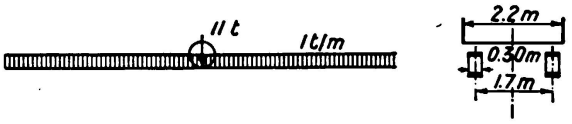
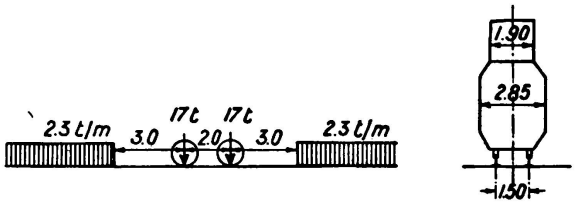


Fig. 2b.



Zulässige Beanspruchung und Material der Gewölbe.

Für normale Belastung, d. h. für Belastung durch Eigengewicht, Verkehr, ± 8° C Temperatur und Schwinden, wurde 100 kg/cm² zugelassen. Für exceptionelle Belastung, d. h. für eine Belastung, bei der außer der oben als normal definierten Belastung noch ± 8° C Temperatur und Winddruck hinzukommen, wurde 120 kg/cm² zugelassen. Die Eigenschaften des für die Gewölbe und die Widerlager angewendeten Betons gehen aus folgender Tabelle hervor.

Portland-zement kg/m³	Wasser-zement-zahl	Gewichtsverhältnisse von Zement : Sand : Feinkies (7 à 30 mm) : Grobkies (30 à 60 mm)	Mittelwerte der Würfelfestigkeit kg/cm²			
			7 Tage	28 Tage	90 Tage	1 Jahr
400	0,54	1 : 2,20 : 1,11 : 1,12	274	464	497	478
365	0,54	1 : 2,54 : 1,24 : 1,24	258	451	488	485

Folgende Gesichtspunkte waren maßgebend für die Bestimmung der Gewölbehöhe h_0 im Scheitel:

1. *Knicksicherheit in der Gewölbeebene:* Bei den hier vorhandenen verhältnismäßig hohen reinen Druckspannungen (70 kg/cm² für Eigengewicht allein) ist es wichtig, das Gewölbe genügend steif auszubilden, um genügende Sicherheit gegen das Ausknicken in der Gewölbeebene zu erreichen.

Bekanntlich liegt die untere Grenze der Schlankheit einer Betonstütze, bei der Ausknickung befürchtet werden kann, etwa bei 55.

Die freie Knicklänge eines eingespannten Bogens von hier vorliegendem Typus kann zu etwa $^1/_3$ der Stützweite l und der Trägheitsradius im Scheitel zu etwa 0,37 der Scheitelhöhe h_0 gesetzt werden. Somit wird der Schlankheitsgrad des Gewölbes

$$\frac{0{,}33\,l}{0{,}37\,h_0} = 0{,}91\,\frac{l}{h_0} \qquad (1)$$

und die kleinste Gewölbestärke im Scheitel

$$0{,}91\,\frac{l}{h_0} = 55 \text{ oder } h_0 = \frac{l}{60}$$

2. *Zusatzspannungen infolge Durchbiegung des Gewölbes.*

Wie bekannt entstehen bei weitgespannten Gewölben Zusatzspannungen infolge Durchbiegung des Gewölbes, die bei schlanken Gewölben die Sicherheit bedeutend reduzieren können.[1]

Bezeichnen: X den Horizentalschub für Eigengewicht und Verkehr, Δ die Durchbiegung des Gewölbes für die Verkehrslast, so kann das durch die Verformung entstehende Zusatzmoment angenähert

$$c \cdot \Delta \cdot X \qquad (2)$$

geschrieben werden. Für den Scheitel ist $c \sim 0{,}7$ und für den Kämpfer $\sim 1{,}0$. (Für den Kämpfer ist die Durchbiegung im Bogenviertel maßgebend.)

Die Berechnung der effektiven Durchbiegungen kann in der Weise geschehen, daß die Durchbiegungen des unverformten Systems mit einem Faktor Γ multipliziert werden, der angenähert aus

$$\Gamma = \frac{\sigma_k}{\sigma_k - \sigma_n} \qquad (3)$$

bestimmt wird. Hier bedeuten σ_k die Euler'sche Knickspannung, berechnet mit Hilfe der Gl. 1 und σ_n die Normalspannung infolge Eigengewicht + Verkehr.

Für die Tranebergsbrücke ist, wenn für den Young'schen Modul $E = 210\,000$ kg/cm² gesetzt wird, $\sigma_k = 690$ kg/cm²; $\sigma_n = 76$ kg/cm² somit

$$\Gamma = \frac{690}{690 - 76} = 1{,}12$$

Die wichtigsten Durchbiegungen für Gewölbe vom Typus der Tranebergsbrücke können aus folgenden Formeln berechnet werden.

[1] Siehe S. Kasarnowsky: Stahlbau 1931 Heft 6.

Scheitel $$\Delta = 0{,}000093 \left(\frac{p\, l^4}{J_o\, E}\right) \Gamma \tag{4}$$

Gewölbeviertel $$\Delta = 0{,}000122 \left(\frac{p\, l^4}{J_o\, E}\right) \Gamma \tag{5}$$

(p = Verkehrslast p. m.; J_o = Trägheitsmoment des Scheitelquerschnittes.)

Für die Tranebergsbrücke sind die berechneten Durchbiegungen für Verkehrslast $p = 7{,}5$ t/m (siehe folgende Tabelle), im Scheitel 2,6 cm und im Viertel 3,3 cm. Der Horizontalschub für Eigengewicht und Verkehr ist $8588 + 782 = 9370$ t, die Zusatzmomente nach Gl. 2 werden somit:

Im Scheitel . . . . . $0{,}7 \times 2{,}6 \times 9370 \times 0{,}01 = 170$ tm
Im Kämpfer . . . . . $1{,}0 \times 3{,}3 \times 9370 \times 0{,}01 = 310$ tm

und die Zusatzspannungen höchstens 1,6 kg/cm², d. h. nur 1,6 % der zulässigen Spannung.

Die Wahl der Scheitelstärke nach Gl. 1 ergibt somit bei den hier vorliegenden zulässigen Spannungen eine genügende Steifigkeit des Gewölbes.

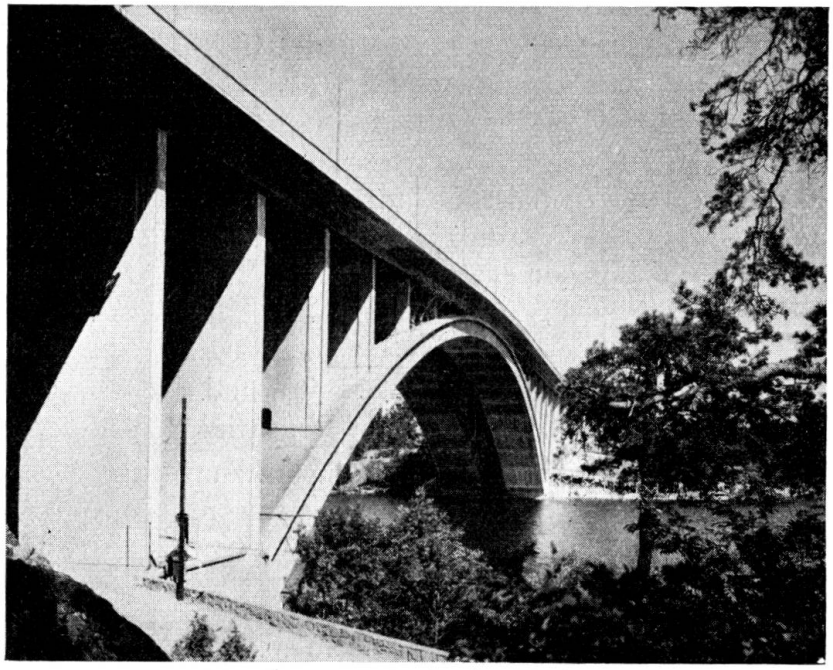


Fig. 4.

Die Gewölbekonstruktion.

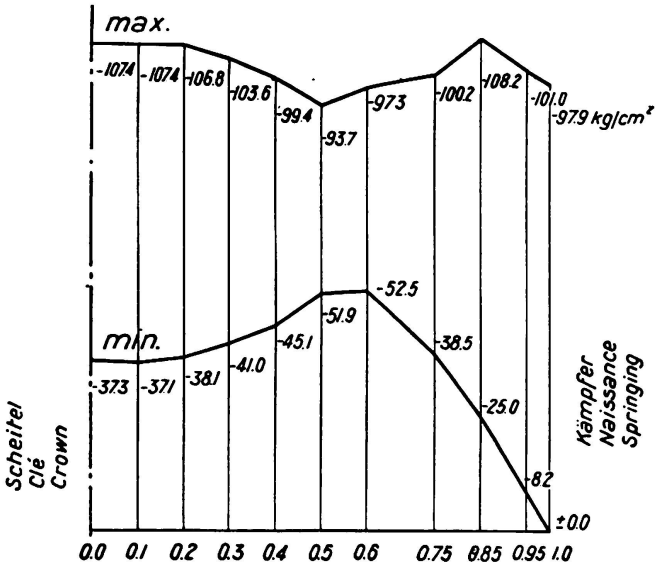
Die Hauptspannweite besteht aus zwei im Achsenabstand von 15,2 m liegenden Betongewölben. Die Gewölbe besitzen einen kastenförmigen Querschnitt mit zwei Zwischenwänden (Fig. 1). Auf einer Strecke von 54 m in der Mitte der Stützweite ist die Gewölbehöhe konstant = 3 m und wächst an den Kämpfern bis auf 5 m an. Die obere Leibung der Gewölbe ist, um ein schlankeres Aussehen zu erreichen, mit Gesimsen versehen (Fig. 4). Die Breite der Gewölbe ohne Gesimse beträgt 9 m.

Folgende Tabelle enthält die wichtigsten Angaben für die Gewölbequerschnitte im Scheitel, Viertelpunkten und Kämpfern.

Querschnitt	Gewölbehöhe m	Querschnitts-fläche m^2	Trägheits-moment m^4	Widerstands-moment m^3
Scheitel	3,00	12,85	15,52	10,30
Gewölbeviertel, . . .	3,16	13,18	17,99	11,30
Kämpfer	5,00	22,05	69,93	28,00

In Fig. 3 ist die Verteilung der größten und kleinsten Spannungen in der Gewölbelängsrichtung dargestellt. Wie aus der Figur zu ersehen ist, entstehen auch bei den ungünstigsten Verhältnissen keine Zugspannungen im Gewölbe. Die größte Spannung, 108,2 kg/cm², entsteht im Abstande von 77 m vom Scheitel und ist wie folgt zusammengesetzt:

Eigengewicht	64,3 kg/cm²
Einfluß der zugehörigen Querexzentrizität	1,0 „
Verkehr	17,8 „
Einfluß der zugehörigen Querexzentrizität	1,1 „
Temperatur —16° C	9,9 „
Schwinden (—10° C)	6,2 „
Wind	7,9 „
Summe	108,2 kg/cm²



Verteilung der max. und min. Spannungen im Gewölbe. (Exceptionneller Belastungsfall)

Répartition des tensions max. et min. dans l'arc. (Cas de charge exceptionnel)

Distribution of stress minima and maxima in arch. (Exceptional case of loading)

Fig. 3.

Das Gießen der Gewölbe erfolgte in zwei Ringen (Fig. 5). Jeder Ring bestand aus 10 Lamellen je Gewölbehälfte mit ca. 1,2 m breiten Fugen. Es wurden, um eine unsymmetrische Belastung des Gerüstes zu vermeiden, immer 2 Lamellen gleichzeitig auf beiden Seiten des Scheitels gegossen.

Der Beton wurde in einer Betonfabrik gemischt und kam in Spezialwagen mit rotierender Trommel von 1,25 m^3 Fassungsvermögen auf den Bauplatz. Vom Wagen wurde der Beton in Kübel gegossen und auf einer Kabelbahn an die Betonierungsstelle gebracht.

Das Betonvolumen eines Gewölbes beträgt (ohne Widerlager) 2740 m^3.

Die Bewehrung des Gewölbes beträgt 62 kg/m^3 Beton, wovon 45 % auf die Längs- und 55 % auf die Querbewehrung entfallen. Das Material besteht aus Baustahl St. 50 mit einer unteren Streckgrenze von min. 30 und einer Dehnung von 20 % der normalen Meßlänge.

Die Gewölbewiderlager.

Der tragfähige Grund, Granitfels, tritt an den Ufern zutage und bildet natürliche Widerlager. Die Widerlager wurden so bemessen, daß die größte Kantenpressung 30 kg/cm^2 nicht übersteigt. Jedes Widerlager wurde mit einem Hohlraum zur Aufnahme von Wasserleitungen von 1 m Durchmesser versehen.

Die Ausführung der Widerlager geschah in trockener Baugrube im Schutze von kreisförmigen Fangdämmen von max. 8 m Wassertiefe.

Das Lehrgerüst (Fig. 5).

Das Lehrgerüst besteht aus vier eingespannten Stahlblechbögen, je einen unter jeder Vertikalwand des Gewölbes. Die Spannweite der Bogen beträgt 172 m und die Pfeilhöhe 25,25 m. Alle Bogenquerschnitte sind konstant und bestehen aus einem Stehblech 2400 × 18, vier Stahlwinkeln 100 × 200 × 18 und zwei Gurtblechen 800×24. Die Stehbleche sind mit je zwei durchgehenden [NP 26 ausgesteift. Das Material der Bogen ist Baustahl St. 52 mit einer unteren Streckgrenze von min. 36 kg/mm^2 und einer Dehnung von 20 % der normalen Meßlänge. Bei Vollbelastung ist die größte Beanspruchung aus Vertikallast 2210 kg/cm^2. (Für die Dimensionierung der Bogen war die Knicksicherheit in der Tragebene maßgebend.)

Das Stahlgewicht des Lehrgerüstes beträgt:

Stahl St. 52 (Blechbogen)	660 t
Stahl St. 44 (Verbände)	195 t
Stahl Stahlguß und Rollen	27 t
Stahl St. 37 Verschiebungsbahnen	66 t
zusammen	948 t

Die Montage des Lehrgerüstes geschah mit Hilfe eines schwimmenden Gerüstes (siehe Fig. 7).

Die Ausrüstung.

Nach dem Fertiggießen des Gewölbes wurden im Scheitel 18 hydraulische Pressen von je 330 t (bei einem Druck von 450 at.) eingesetzt und die Gewölbe-

hälften im Obergurt um 11 cm und im Untergurt um 10 cm auseinander gespreizt. Der Gewölbescheitel wurde dadurch 17 cm gehoben und auf einer Strecke von ca. 20 m vom Lehrgerüst losgelöst. Der gemessene Horizontalschub war in diesem Zustand 6000 t oder um 575 t größer als der unter Annahme einer mit der Gewölbemittellinie zusammenfallenden Stützlinie berechnete. Nun wurden in den Kämpfern des Lehrgerüstes 16 Pressen, je zwei für jeden Bogenauflager, eingeschaltet und das Lehrgerüst gesenkt, wodurch eine vollständige Ablastung stattfand.

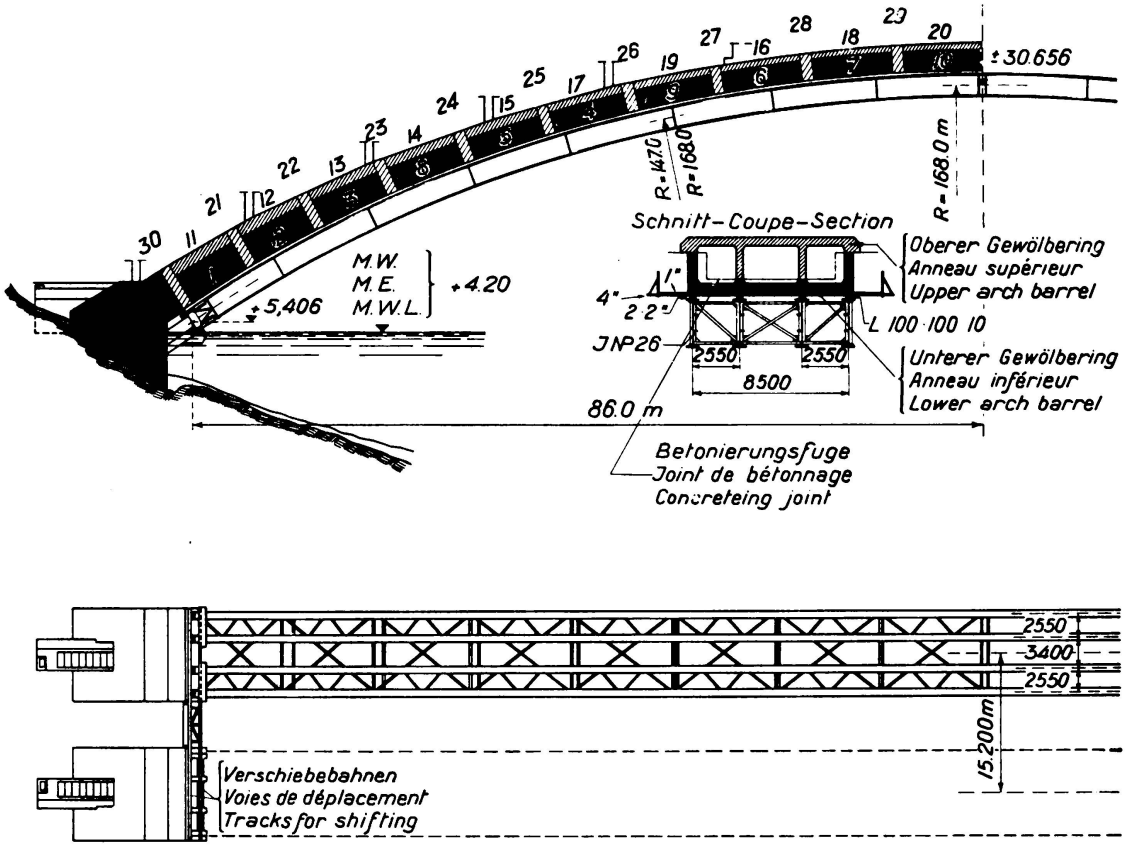


Fig. 5 u. 6.

Nach der Entlastung wurde das Gerüst auf Rollen abgesetzt und seitwärts um 15,2 m in die Lage des zweiten Gewölbes verschoben.

Die Regulierung der Spannungen nach dem Verfahren von *Freyssinet* geschah mit 22 Pressen. Im Gewölbescheitel wurde ein negatives Biegungsmoment von 1590 tm und ein überschüssiger Horizontalschub von 375 t eingeführt, so daß in schließlicher Lage die Scheitelfuge im Ober- und Untergurt = 4,0 cm blieb. Nach dem Ausgießen der Scheitelfuge mit Mörtel von 570 kg Zementgehalt wurden die Pressen entfernt und die Nischen mit Beton ausgefüllt.

Die Probebelastung der Gewölbe.

Die statische Belastung bestand aus Sandlast auf der Straßenfahrbahn und aus Materialwagen auf den Geleisen. Im ganzen wurden 8,45 t/m, d. h. 13 % mehr als der Berechnung zugrunde gelegt, aufgebracht. Die größten Durchbiegungen betrugen im Scheitel 28,7 mm, wovon ca. 10 mm unelastisch und im

Bogenviertel 29,7 mm, wovon 7 mm unelastisch. Gleichzeitig wurden im Kämpfer mit einem Deformeter von *Huggenberger* Spannungen gemessen. Die größte Spannung betrug 17,7 kg/cm², die mit der theoretisch berechneten, bei Annahme von E = 300 000 kg/cm² übereinstimmt.

Dynamische Belastung wurde durchgeführt mit zwei 33,5 Tonnen Straßenbahnboggiewagen, je einem auf jedem Geleise mit Fahrgeschwindigkeiten von 15,9 bis 43,8 km/St. Die Durchbiegungsmessung im Scheitel geschah mit Hilfe eines Stoppanis' Schwingungsmessers. Es konnten wie Fig. 7b, c, d zeigen, einflußlinienähnliche Durchbiegungslinien aufgenommen werden. Die gemessene größte Durchbiegung (unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit) betrug 1,7 mm, was mit der berechneten, bei Annahme von E = 570 000 kg/cm² übereinstimmt.

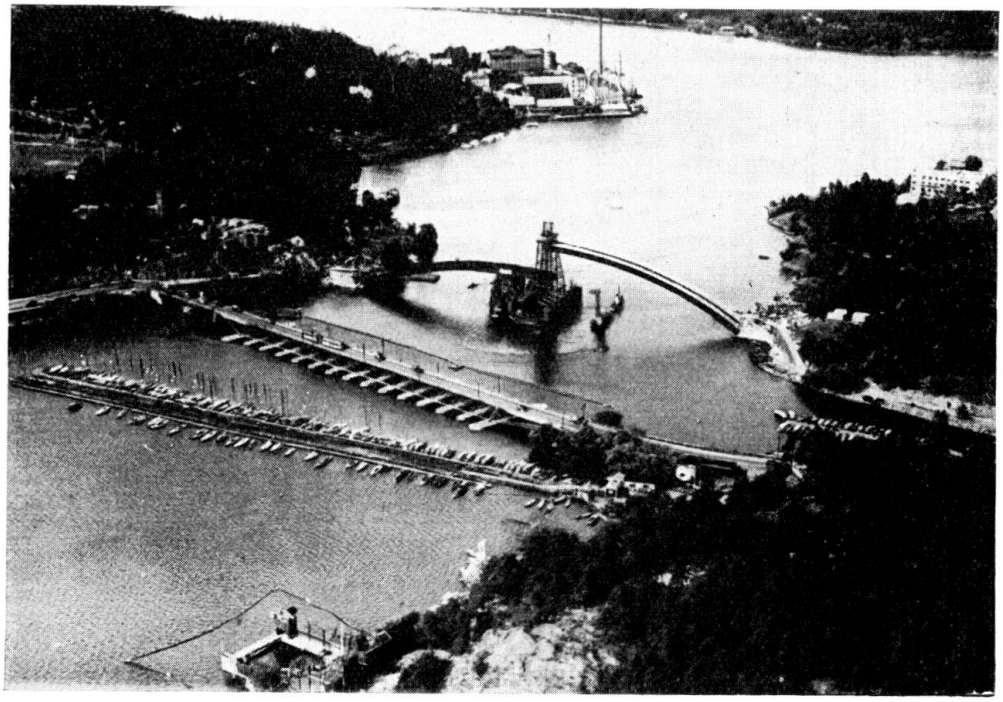


Fig. 7.

Schließlich wurden noch vertikale und horizontale Eigenschwingungen des Gewölbes gemessen. Die letzteren Messungen geschahen mit einem vom Verfasser konstruierten astatischen Pendel mit einer Eigenschwingungszeit von 4 Sec. und ergaben eine Eigenfrequenz von 1,3 Hertz (Fig. 8e). Die vertikalen Schwingungen wurden durch taktfestes „auf der Stelle" Hüpfen von vier Mann erzeugt und gaben eine Eigenfrequenz von 2,0 Hertz (Fig. 7a).

Temperaturmessungen.

Um die Betontemperatur im Gewölbe zu messen wurden im Kämpfer und im Scheitel elektrische Widerstandsthermometer eingebaut. Es wurden gleichzeitig Betontemperatur, Lufttemperatur in den Hohlräumen, Außentemperatur der Luft und die vertikale Bewegung des Gewölbescheitels gemessen. Jedem Grad Celsius entspricht rechnerisch (bei Annahme eines Dilatationskoeffizienten von 0,000 010) eine Scheitelbewegung von 3,4 mm, welche Zahl auch durch Versuche bestätigt wurde. Diese Messungen werden noch einige Jahre periodisch

durchgeführt, um den genauen Wert des Schwindmaßes des Gewölbebetons zu erhalten. Aus den Gewölbescheitelbewegungen im Laufe der Jahre 1934—1935 kann ein Schwindmaß entsprechend einer Temperatursenkung von — 5° C für das südliche und — 3° C für das nördliche Gewölbe berechnet werden.

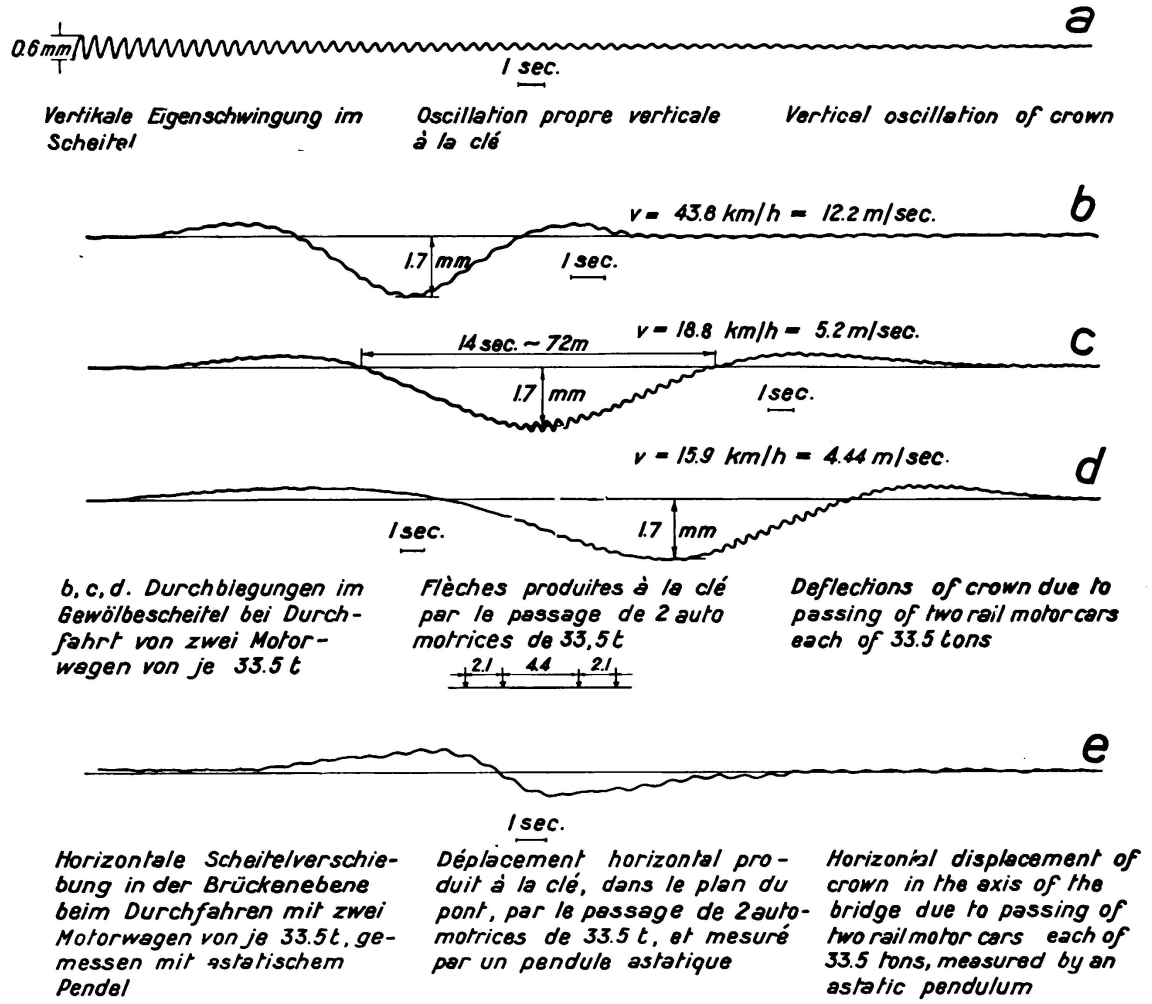


Fig. 8.

Die Kosten der Gewölbewiderlager, Gewölbe und des Lehrgerüstes betrugen 1.633.000 Kronen, verteilt wie folgt:

Widerlager 4 St., 1858 m³ . . .	255.000 Kr. in %	15,6
Gewölbe 2 St., 5480 m³	634.000 „ „ „	38,9
Lehrgerüst mit Auflagerkonsolen .	744.000 „ „ „	45,5
Zusammen	1.633.000 Kr. in %	100,0

Zum Vergleich mögen hier die Kosten einer Stahlbogenkonstruktion von gleicher Spannweite und Belastung angegeben werden:

Widerlager	145.000 Kr.
Stahlbögen und Hauptwindverband 2100 t à 850 Kr.	1.785.000 Kr.
	1.930.000 Kr.

Da die Kosten der Fahrbahnkonstruktion in beiden Fällen nahezu gleich sind, ist der Beton in diesem Falle dem Stahle wirtschaftlich bedeutend überlegen.

Zusammenfassung.

Aus der Erfahrung beim Bau der Tranebergsbrücke können folgende Leitsätze für die Konstruktion von weitgespannten Gewölben gezogen werden.

Das Gewölbe kann auf der Strecke zwischen den Gewölbevierteln und dem Scheitel mit konstantem Querschnitt, mit einer Bauhöhe von mindestens $^1/_{60}$ der Spannweite, ausgeführt werden. Gegen die Kämpfer hin kann dann die Gewölbehöhe bis auf etwa 1,4 — 1,8 der Scheitelhöhe anwachsen. Bei freistehenden Gewölben muß die Gewölbebreite, um genügende Sicherheit gegen seitliches Ausknicken zu erhalten, mindestens $^1/_{28}$ bis $^1/_{30}$ der Spannweite betragen.

Die Parasitspannungen infolge Zusammendrückung der Bogenachse bei Eigengewichtsbelastung, sowie ein Teil der Temperatur- und Schwindspannungen, können nach dem Verfahren von *Freyssinet* eliminiert werden.

Beim Entwerfen des Lehrgerüstes, was hier von besonderer Bedeutung ist, muß darauf geachtet werden, daß dasselbe genügende Steifigkeit besitzt, da sonst die Ausrüstung Schwierigkeiten bieten kann.

Was das Material des Lehrgerüstes betrifft, so kann sowohl hochwertiger Stahl als Holz in Frage kommen.

Zum Schluß möge noch bemerkt werden, daß im wirtschaftlichen Wettbewerb zwischen Beton und Stahl die Anzahl der mit dem gleichen Lehrgerüst betonierten Gewölbe eine entscheidende Rolle spielt. Je größer diese Anzahl ist, desto wirtschaftlicher wird die Betonbauweise. Ein einziges großes Betongewölbe auszuführen kann nur unter ganz besonders günstigen Verhältnissen wirtschaftlich sein.