



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000299724

GEWICHTE UND GÜNSTIGSTE
ABMESSUNGEN DER DURCH
PARALLELTRAGER
VERSTEIFTEN KABELBRÜCKEN

Dr.-Ing. W. Thiele



Druck: A.

Verlag des Verfassers, A. Thiele, 1881, 11. Preis

1881

493^x

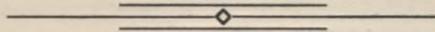
F. v. L.

GEWICHTE UND GÜNSTIGSTE
ABMESSUNGEN DER DURCH
PARALLELTRÄGER
VERSTEIFTEN KABELBRÜCKEN.

Von

Dr.-Ing. **W. Hauffe.**

31/3



Dresden-A.

Akademische Buchhandlung A. Dressel (Inh.: H. Focken)

1910.

G. 58

106



1132253

Akc. Nr. 5025/51

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Grundlegende Annahmen	1
II. Ermittlung der theoretischen Hauptträgergewichte für die Bauart mit einer Öffnung	3
1. Gurtungen	3
a) Herleitung der Gewichte aus den Momenten	3
b) Darstellung der Momente und Momentenflächen	4
α) Verkehrslast	4
β) Temperatur	7
c) Gewichtformeln	9
2. Wandstäbe	9
a) Herleitung der Gewichte aus den Querkräften	9
b) Darstellung der Querkräfte und Querkraftflächen	10
α) Verkehrslast	10
β) Temperatur	13
c) Gewichtformeln	13
3. Der Beiwert der Bogenkrafteinflußfläche	14
4. Zahlenmäßige Ermittlung der theoretischen Hauptträgergewichte	18
5. Näherungsformeln	23
III. Ermittlung der theoretischen Hauptträgergewichte für die Bauart mit zwei Seitenöffnungen	24
1. Der Beiwert der Bogenkrafteinflußfläche	24
2. Temperatureinfluß	28
3. Zahlenmäßige Ermittlung der theoretischen Gewichte	29
4. Näherungsformeln	33
5. Einfluß einer Änderung der festgenommenen Werte	34
IV. Theoretische Gewichte von	
1. Kabel	35
2. Hängeseilen	36
V. Günstige Pfeil- und Trägerhöhe	37
VI. Die wirklichen Gewichte (mit Beispiel)	40
VII. Schlußbemerkung	42

I. Grundlegende Annahmen.

Durch Parallelträger versteifte Kabelbrücken stehen im Hängebrückenbau an erster Stelle, gehören doch die bedeutendsten Hängebrücken, vor allem die drei Kabelbrücken über den Eastriver in New-York dieser Bauart an. Bei den zwei zuletzt gebauten, der Williamsburg und Manhattan-Brücke haben Kabel und Parallelversteifungsträger nach heftigem Kampfe über die Kettengirlandenträger den Sieg davon getragen; entscheidend waren die bedeutend höheren Kosten der Kette.¹⁾ Bei der Elisabeth-Brücke in Ofen-Pest haben nur besondere Gründe zur Wahl der Kette geführt, die Kosten des Bauwerkes sind schließlich auch sehr bedeutend geworden.¹⁾

Die Kabel werden in Amerika, das im Hängebrückenbau Europa weit voraus ist, als Paralleldrahtkabel nach dem Luftspinnverfahren hergestellt, und zwar seit dem Bau der Williamsburg-Brücke in völlig einwandfreier Weise. Die Verwendung von Spiral oder verschlossenen Seilen ist nicht gebräuchlich, bei den großen Werken wohl auch kaum anwendbar.

Zur Herstellung der Kabel werden Tiegelgußstahldrähte verwendet von 13—15 t/qcm Festigkeit; die Drähte (Φ rd. 0,5 cm) der Manhattan-Brücke²⁾ z. B. hatten eine Festigkeit von durchschnittlich 14,9 t/qcm, ihre Fließgrenze lag bei 9,7 t/qcm, als zulässige Beanspruchung waren rund 5 t/qcm zugelassen. Dieser Wert wurde auch bei den nachfolgenden Berechnungen angenommen.

Als neuer Baustoff für die Hauptträger weit gespannter Brücken tritt Nickelstahl auf; er wurde beim Bau der jüngsten Riesenbrücken, der Blackwell Island- und der Manhattan-Brücke verwendet. Die durch die höhere zulässige Beanspruchung erzielte Gewichtsersparnis macht sich besonders bei Hängebrücken bemerkbar, da sie sich hier auf die Kabel, Pilone und Wider-

¹⁾ Mehrtens, Vorlesungen über Ingenieurwissenschaften, II: Brückenbau 1 S. 246 u. 724.

²⁾ Report by R. Modjeski, Chicago 1909; Engineering Record 1909, 2. Okt.

lager fortpflanzt. Daß der Einfluß nicht gering ist, kann man daraus ermessen, daß das Gewicht der Hauptträger der Manhattan-Brücke 30 Hundertstel des Gesamtgewichtes (Kabel + Hängeseile + Hauptträger + Fahrbahn + Verbände) beträgt. Das bei der letztgenannten Brücke verwendete Material besaß eine Festigkeit von durchschnittlich 6,2 t/qcm, die Elastizitätsgrenze lag bei 4,15 t/qcm. Als zulässige Beanspruchung wurde für Zug 40000 lbs/sq. i (2,8 t/qcm), für Druck (40000—150 l/r) lbs/sq. i (d. i. durchschnittlich 2,7 t/qcm) vorgeschrieben. Da in Zukunft die Verwendung von Nickelstahl beim Bau weit gespannter Hängebrücken — nur bei solchen ist dies System wirtschaftlich — mit Sicherheit anzunehmen ist, wurde dieser Baustoff den Ausmittlungen zugrunde gelegt. Die zulässige Beanspruchung wurde zu 2,5 t/qcm angenommen, da die Werte der Manhattan-Brücke reichlich hoch erscheinen. Unter III, 4 wurde der Einfluß von Abweichungen gegen obige Annahmen untersucht.

Ferner wurde angenommen, daß die Kabelachse eine Parabel ist. Dies erscheint zulässig, da die Abweichungen von der wirklichen Seillinie, z. B. bei der Manhattan-Brücke, nur 1 bis 2 Tausendstel betragen.

Bei den versteiften Kabelbrücken kann man zwei Hauptarten unterscheiden, solche mit einer Öffnung und Rückhaltkabeln (Abb. 1) — die Williamsburg-Brücke zeigt diese Gestalt —,

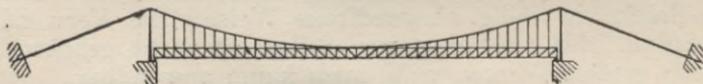


Abb. 1.

wobei Kabel und Rückhaltkabel an der Pylone denselben Winkel gegen die Wagerechte bilden. Die andere Art besteht aus einer Mittelöffnung und zwei halb so weiten Seitenöffnungen (Abb. 2) — wie z. B. die Manhattan-Brücke. Damit an der

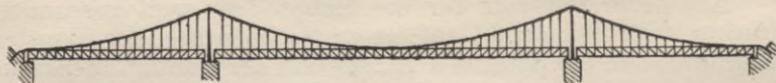


Abb. 2.

Pilonenspitze Gleichgewicht vorhanden ist, muß der Pfeil der Seitenöffnung gleich ein Viertel des Pfeiles der Hauptöffnung sein.

Für diese beiden Bauarten sind die theoretischen Gewichte, für die Hauptträger aus Einflußflächen, ermittelt worden, und zwar für das System II nur für die Mittelöffnung, da das

Moment der Bogenkraft in der Seitenöffnung gegen das Balkenmoment gering ist, die Versteifungsträger also nahezu das Gewicht von Balkenträgern haben. Die Spannkkräfte in den Gurten infolge Wind sind nicht berücksichtigt worden, da in diesem Falle gewöhnlich höhere Beanspruchungen zugelassen werden. Ferner wurde die Annahme gemacht, daß das gesamte Eigengewicht vor Schluß der Versteifungsträger an das Kabel gehängt wird, der Träger also nur von der Verkehrslast Spannungen erfährt. Da Vollasten nur geringe Momente erzeugen, erschien diese Vereinfachung erlaubt. Man hat sie auch bei der Berechnung der New-Yorker Brücken gemacht, den Einfluß der nach Schluß der Träger aufgebrachten Eigenlasten später nachgerechnet.

Für verschiedene Werte der Verhältnisse von Eigengewicht zur Verkehrslast, Stützweite zur Pfeil- und Trägerhöhe wurden die Ergebnisse zeichnerisch und tabellarisch dargestellt. Schließlich wurde eine Näherungsformel für die theoretischen Hauptträgergewichte gebildet und Untersuchungen über günstigste Pfeil- und Trägerhöhen angestellt.

II. Ermittlung der theoretischen Hauptträgergewichte für die Bauart mit einer Öffnung.³⁾

1. Gurtungen.

a) Herleitung der Gewichte aus den Momenten. Wie man Gurtspannkkräfte und -querschnitte aus den Momenten der äußeren Kräfte berechnet, so wird man die Gewichte der Gurtungen, da sie den Querschnitten proportional sind, ebenfalls aus den Momenten herleiten. Bedeuten

M Moment in bezug auf den Drehpunkt eines Gurtstabes

σ_0 die zulässige Spannung eines Gurtstabes

F_0 der Querschnitt eines Gurtstabes

h die Höhe des Versteifungsträgers

a Feldweite

n Zahl der Felder

γ spezifisches Gewicht,

³⁾ Bezüglich der im folgenden angewendeten Formeln s. Müller-Breslau, Statik II. 1 S. 266 ff. Die dort für Kettenbrücken aufgestellten Formeln wurden, soweit nötig, für Kabelbrücken abgeändert und entsprechende Formeln für das System II abgeleitet.

so wird das Gewicht eines Gurtes

$$G_g = n \cdot \gamma \sum F \cdot a$$

und mit

$$F = \frac{M}{h \cdot \sigma}$$

$$G_g = \frac{n \cdot \gamma}{h \cdot \sigma} \sum M \cdot a$$

$n \sum M \cdot a$ darf man gleich dem Inhalt der Momentenfläche setzen, der Unterschied für Ober- und Untergurt ist von fast gleicher Größe und entgegengesetztem Vorzeichen. Das Gewicht beider Gurte wird dann dargestellt durch den Wert

$$G_{o+u} = \frac{2\gamma}{\sigma \cdot h} \int_0^l M dx \quad (1)$$

b) Darstellung der Momente und Momentflächen. Wie weiterhin (a) bewiesen wird, kommen zur Gewichtsbestimmung nur die positiven Größtmomente als die absolut größten in Betracht. Da die gesamte ständige Last unmittelbar an das Kabel übertragen wird, so ist

$$\max M = \max M_p + M_t. \quad (2)$$

Der Wert $\max M_p$, der positive Grenzwert des Momentes aus der Verkehrslast, soll aus der Einflußlinie, M_t das Moment der Temperaturbogenkraft, analytisch abgeleitet werden.

Bevor dies geschieht, soll wiederholt (1) werden, daß die Kabelachse als Parabel der Gleichung

$$y = \frac{4fx}{l^2} (l - x) \quad (3)$$

angenommen wird, wobei f der Pfeil des Kabels und l die Stützweite des Trägers ist.

a) Verkehrslast. Zunächst soll gezeigt werden, daß die positiven Momente die absoluten Größtwerte ergeben. Bezeichnet M_p das Moment für gleichförmige Vollast, so ist

$$M_p = \min M_p + \max M_p$$

Bedeutet ν den Beiwert der H-Fläche (so soll die Bogenkrafteinflußfläche von jetzt ab kurz bezeichnet werden), so ist mit

$$M_p = \frac{P}{2} x (l - x) (1 - \nu) \quad (4)$$

$$\max M_p = - \min M_p + \frac{P}{2} x (l - x) (1 - \nu) \quad (5)$$

Da ν immer kleiner als 1 ist, so muß absolut genommen $\max M_p$ größer als $\min M_p$ sein, womit Gl. (2) bewiesen ist.

Im folgenden soll aus der Einflußfläche ein analytischer Ausdruck für $\min M_p$ hergeleitet werden. Abb. 3 stellt die Einflußlinie des Momentes in bezug auf den Punkt m des Versteifungsträgers dar. Um die Abbildung nicht undeutlich zu machen, wurden Träger und Richtungslinie RR zusammengelegt;

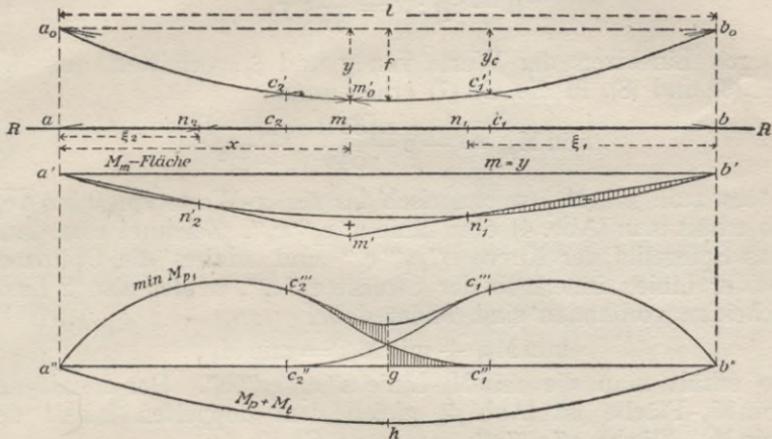


Abb. 3 u. 4.

letztere wird zum Festlegen der Lastscheiden benutzt, ihr Abstand von der Geraden $a_0 b_0$, der Verbindungslinie der Schnittpunkte der Kabelachse mit den Auflagerlotrechten ist $4f/3\nu$. Solange m innerhalb $\overline{c_2 c_1}$ liegt — c_1 und c_2 sind die Punkte, deren eine Lastscheide in die Auflagerlotrechte fällt —, sind 2 Lastscheiden vorhanden. Wir betrachten vorläufig nur den der Belastungsstrecke ξ_1 entsprechenden, schraffierten Teil. Dessen Inhalt verhält sich zum Inhalt der ganzen Einflußfläche wie ξ_1^3 zu l^3 . Die Gleichung der parabelförmig angenommenen Einflußlinie lautet

$$y_H = \frac{3}{4} \frac{x(1-x)}{fl} \nu. \quad (6)$$

Von dem Beiwert ν wird weiter unten (II, 3) die Rede sein. Die ganze Einflußfläche hat den Inhalt

$$\int_0^1 y_H = \frac{l^2}{8f} \nu,$$

dann wird, wenn die Strecke ξ_1 mit p für 1 lfd. m belastet ist,

$$\min M_{p_1} = -y \cdot p \cdot \frac{l^2 \nu \xi_1^3}{8f l^3}. \quad (7)$$

Aus der Abb. 3 ergibt sich

$$\overline{a n_1} : \overline{a m} = \overline{a a_0} : (\overline{a a_0} - m m_0')$$

oder

$$(l - \xi_1) : x = \frac{4f}{3\nu} : y. \quad (8)$$

Durch Einsetzen der Werte von y und ξ_1 , ermittelt aus den Gl. (3) und (8), in die Gl. (7) erhält man

$$\min M_{p_1} = -p \frac{x [3\nu(l-x) - l]^3}{54\nu^2(l-x)^2}. \quad (9)$$

Stellt man $\min M_{p_1}$ zeichnerisch dar für x -Werte von 0 bis $\overline{a c_1}$, so erhält man (Abb. 4) eine Linie $a''c_2'''c_1''$. Zeichnet man dann das Spiegelbild der Kurve $b''c_1'''c_2''$ und addiert die Ordinaten beider Linien innerhalb der Strecke $c_2''c_1''$, in der also 2 Lastscheiden vorhanden sind, bildet dabei

$$\min M_{p_1} + \min M_{p_2} = \min M_p,$$

so erhält man die $\min M_p$ -Linie $a''c_2'''c_1'''b''$. Der Inhalt der $\min M_p$ -Fläche ist (Abb. 4) gleich dem doppelten Inhalt der $\min M_{p_1}$ -Fläche $a''c_2'''c_1''$, also aus Gl. (9)

$$\min M_p\text{-Fläche} = 2 \int_0^{\overline{a''c_1''}} \min M_{p_1} = \frac{p}{27\nu^2} \int_0^{\overline{a''c_1''}} \frac{x [3\nu(l-x) - l]^3}{(l-x)^2} dx. \quad (10)$$

Die Strecke $a''c_1''$ ist gleich der Strecke $a c_1$ (Abb. 3). Aus der letzteren Abb. findet man

$$y_c : 4f/3\nu = \overline{a c_1} : l. \quad (11)$$

Als Parabelordinate ist

$$y_c = 4f/l^2 \cdot \overline{b c_1} \cdot \overline{a c_1}. \quad (12)$$

Aus Gl. (11) und (12) erhält man durch Aussonderung von y_c

$$\overline{b c_1} = l/3\nu$$

und

$$\overline{a''c_1''} = \overline{a c_1} = l - b c_1 = l(1 - 1/3\nu), \quad (13)$$

die obere Grenze des Integrals der Gl. (7). Nun ist

$$\min M_p\text{-Fläche} = \frac{p}{27\nu^2} \int_0^{l(1-1/3\nu)} \frac{x [3\nu(l-x) - l]^3}{(l-x)^2} dx. \quad (14)$$

Nach Ausführung der Integration wird (etwas umgeformt)

$$\min M_p\text{-Fläche} = \frac{1}{27\nu^2} [4,5\nu^3 - 13,5\nu^2 - 56,7724\nu + (9\nu + 1)\ln 1000\nu - 2,9792] pl^3. \quad (15)$$

Da die Werte $\max M_p$ in Frage kommen, so ist noch die M_p -Fläche zu ermitteln. Es war Gl. (4)

$$M_p = \frac{P}{2} x(1-x)(1-\nu),$$

also

$$M_p\text{-Fläche} = \int_0^1 M_p = \frac{1-\nu}{12} pl^3. \quad (16)$$

Gl. (15) und (16) geben zusammen $\max M_p$ -Fläche.

In der Abb. 5 ist die $\max M_p$ -Fläche als $f(\nu)$ dargestellt. Beim Auftragen im Maßstab der Abb. 5, ergibt sich eine flache

Kurve, für die im Geltungsbereich für ν eine Gerade gesetzt werden kann. Aus der späteren Berechnung von ν ersieht man, daß für die Bauart I (1 Öffnung) bei Annahme gewöhnlicher

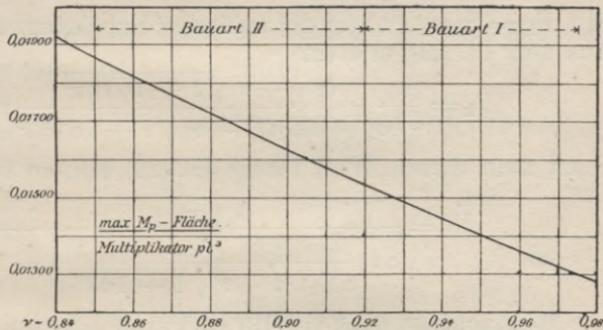


Abb. 5.

Verhältnisse von g/p und l/h ν zwischen 0,92 und 0,975, bei der Bauart II (mit 2 Seitenöffnungen) bei der dieselbe Gleichung für die H-Linie genommen wird, zwischen 0,85 und 0,92 schwankt. Für die angenäherten Geraden erhält man als Gleichung für die Bauart I

$$\max M_p\text{-Fläche} = [-0,042\nu + 0,05395] pl^3, \quad (17)$$

für die Bauart II

$$\max M_p\text{-Fläche} = [-0,048\nu + 0,05945] pl^3. \quad (18)$$

β) Temperatur. Das Moment der Temperaturbogenkraft H_t ist

$$M_t = H_t \cdot y. \quad (19)$$

Es ist (die Ableitung wird für die Bauart II gegeben (III, 3))

$$H_t = \mp \alpha E_{kt} F_k (1 - \nu), \quad (20)$$

hierbei ist

- α Temperaturdehnungsmaß für 1°C
- $\pm t$ Zahl der C° über oder unter der normalen Temperatur
- E_k Elastizitätszahl
- F_k Kabelquerschnitt.

Da wir zur Bildung von $\max M$ ein positives M_t brauchen, so setzen wir $t = -t$, H_t also positiv. Der Kabelquerschnitt F_k berechnet sich aus dem Größtwert von H . Es ist

$$\max H = \frac{l^2}{8f} (g + p\nu) + \alpha E_{kt} F_k (1 - \nu). \quad (21)$$

Die größte Kabelspannkraft S_k hat den Wert, wenn α_0 der Winkel der Kabelachse gegen die Wagerechte an der Pylone ist

$$S_k = \frac{\max H}{\sin \alpha_0} = \max H \sqrt{1 + 16 f^2 / l^2}. \quad (22)$$

Mit $F_k = S_k / \sigma_k$, σ_k ist die zulässige Kabelspannung, erhält man aus den Gl. (21) und (22)

$$F_k = \frac{1}{8f} \frac{(g/p + \nu) \sqrt{1 + 16 f^2 / l^2}}{\sigma_k - \alpha E_{kt} (1 - \nu) \sqrt{1 + 16 f^2 / l^2}} pl^2. \quad (23)$$

Setzt man diesen Wert in die Gl. (20) ein, so wird

$$H_t = \frac{g/p + \nu}{8f \left[\frac{\sigma_k}{\alpha E_{kt} (1 - \nu) \sqrt{1 + 16 f^2 / l^2}} - 1 \right]} pl^2. \quad (24)$$

Die M_t -Fläche ist nach Gl. (19) ein Parabelabschnitt von der Höhe $H_t \cdot f$,

sein Inhalt also $2/3 H_t \cdot f \cdot l$ — und H_t aus Gl. (24) eingesetzt — ergibt

$$M_t\text{-Fläche} = \frac{g/p + \nu}{12 \left[\frac{\sigma_k}{\alpha E_{kt} (1 - \nu) \sqrt{1 + 16 f^2 / l^2}} - 1 \right]} pl^3. \quad (25)$$

In der Abb. 6 sind die M_t -Flächen zeichnerisch dargestellt für $g/p = 1, 2, 3$ und $l/f = 8, 10, 12$. Es ergeben sich nahezu gerade Linien, die sich in einem Punkte 1; 0 schneiden. Deren Gleichung lautet für $l/f = 10$ — mit geringem Fehler auch für die Nachbarwerte gültig, da $\int M_t$ klein gegen $\int \max M_p$ ist —

$$M_t\text{-Fläche} = (1 - \nu) (0,0185 g/p + 0,0170) pl^3. \quad (26)$$

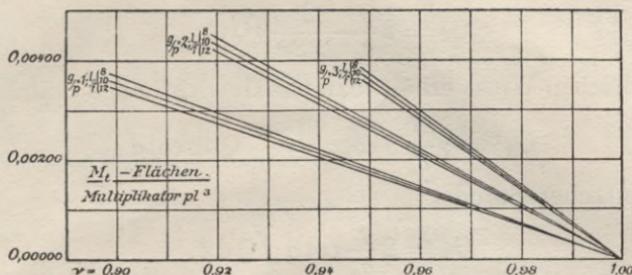


Abb. 6.

c) Gewichtsformen. Die theoretischen Gurtgewichte erhält man durch Einsetzen der Werte $\int M dx$ aus den Gl. (15), (16) und (25) in die Gl. (1), welche lautete

$$G_{o+u} = \frac{2\gamma}{h \cdot \sigma} \int M dx.$$

Es war

$$M = \max M = \max M_p + M_t = - \min M_p + M_p + M_t.$$

Daraus folgt das Gewicht beider Gurte

$$G_{o+u} = 2 \frac{1}{h} \left[\frac{1}{27 \nu^2} [4,5\nu^3 - 13,5\nu^2 - 56,7724\nu + (9\nu+1)\ln 1000\nu - 2,97916] + \frac{1-\nu}{12} + \frac{g/p + \nu}{12 \left[\frac{\sigma_k}{\alpha E_k t (1-\nu) \sqrt{1+16f^2/l^2}} - 1 \right]} \right] \frac{\gamma}{\sigma_0} pl^2. \quad (27)$$

2. Wandstäbe.

a) Herleitung der Gewichte aus den Querkräften. Da es sich um einen Parallelträger handelt, wird man die Gewichte oder zunächst die Stabkräfte aus den Querkräften ermitteln. Es ist — ohne Rücksicht auf das Vorzeichen (Abb. 7).

$$D = Q / \cos \alpha; \quad V = Q.$$

Wie bei den Momenten wird später (b) gezeigt, daß $\max Q$ die absoluten Größtwerte liefert. Das Gewicht einer Strebe ist

$$G_d^1 = \gamma \frac{D}{\sigma_0} \frac{a}{\sin \alpha} = \frac{\gamma}{\sigma_0} \frac{2Q \cdot a}{\sin 2\alpha}.$$

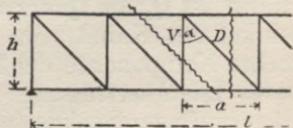


Abb. 7.

$Q \cdot a$ stellt genau genug den Inhalt der Querkraftfläche über einem Felde a dar; darnach ist das Gewicht aller Streben

$$G_d = 2 \frac{\gamma}{\sigma_0} \frac{2}{\sin 2\alpha} \int_0^{1/2} Q dx. \quad (28)$$

In der gleichen Weise erhält man das Gewicht eines Ständers mit

$$G_v^1 = \gamma \frac{V}{\sigma_0} a \cot \alpha = \frac{\gamma}{\sigma_0} Q \cdot a \cdot \cot \alpha$$

und sämtlicher Ständer

$$G_v = 2 \frac{\gamma}{\sigma_0} \cot \alpha \int_0^{1/2} Q dx. \quad (29)$$

Gl. (28) und (29) geben zusammen das Gewicht der ganzen Wand

$$G_{d+v} = 2 \frac{\gamma}{\sigma_0} \left(\frac{2}{\sin 2\alpha} + \cot \alpha \right) \int_0^{1/2} Q dx. \quad (30)$$

Der Klammerausdruck hat seinen Kleinstwert für $\alpha = 51^\circ 20'$; seine Größe ist dann 2,85; für $\alpha = 45^\circ$, welcher Wert den Ausmittlungen zugrunde gelegt wird, ist der Wert gleich 3, also

$$G_{d+v} = 2 \cdot 3 \cdot \frac{\gamma}{\sigma_0} \int_0^{1/2} Q dx. \quad (31)$$

b) Darstellung der Querkräfte und Querkraftflächen. Für Q in Gl. (30) oder (31) ist einzusetzen

$$Q = \max Q = \max Q_p + Q_t. \quad (32)$$

Ähnlich wie bei den Momenten ergibt sich aus

$$\min Q_p + \max Q_p = Q_p = p(1 - \nu) \left(\frac{1}{2} - x \right), \quad (33)$$

daß $\max Q_p$ als absolut größerer Wert der Rechnung zugrunde zu legen ist.

a) Verkehrslast. Allgemein läßt sich die Querkraft unseres Systems darstellen mit

$$Q = Q_0 - H \operatorname{tg} \alpha. \quad (34)$$

Hierin ist Q_0 die Querkraft des Hauptsystems, α der Neigungswinkel des Kabels im betrachteten Felde, $H \operatorname{tg} \alpha$ also die lotrechte Komponente der Bogenkraft. Bei der Annahme unmittelbarer Lastübertragung, d. h. bei Vernachlässigung des Längsträgerauflagerdruckes im Felde, was bei der geringen Größe der Feldweite gegenüber der Stützweite zulässig erscheint, wird

$$Q = A - H \operatorname{tg} \alpha. \quad (35)$$

Die Lastscheide n_2 liegt im Schnitt der Richtungslinie RR mit einer zur Kabeltangente im betrachteten Felde Parallelen durch a_0 .

2 Lastscheiden sind vorhanden, solange n_2 innerhalb \overline{ab} liegt. In Abb. 8 ist die Einflußlinie der Querkraft für das Feld $m, m+1$ dargestellt, und zwar Balken- und Bogeneinfluß getrennt. Die mit p belastete Strecke $n_1 n_2 = (\xi_1 - x)$ ruft $\max Q_p$ hervor. Aus der Abb. 8 ergibt sich für den belasteten Teil (schraffiert) der A-Einflußlinie

$$A''_{m, m+1} = \frac{\xi_1 - x}{2} \left[\frac{\xi_1 \cdot 1}{1} + \frac{(1-x) \cdot 1}{1} \right] + \frac{1}{2l} (\xi_1 - x) (2l + \xi_1 - x). \quad (36)$$

Ist nur 1 Lastscheide vorhanden, so wird mit $\xi_1 = 1$

$$A'_{m, m+1} = \frac{(1-x)^2}{2l}. \quad (37)$$

Die Gl. (6) der H-Linie lautet

$$H = p \frac{3x(1-x)}{4fl} \nu.$$

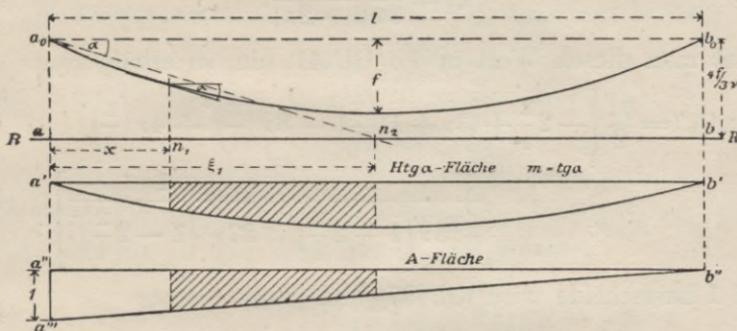


Abb. 8.

Der belastete Teil der H-Fläche hat dann den Inhalt

$$H'' = p \frac{3\nu}{4fl} \int_x^{\xi_1} x(1-x) dx = p \frac{3\nu}{4fl} \left[\frac{1}{2} (\xi_1^2 - x^2) - \frac{1}{3} (\xi_1^3 - x^3) \right]; \quad (38)$$

wenn nur 1 Lastscheide vorhanden ist mit $\xi_1 = 1$

$$H' = p \frac{3\nu}{4fl} \left(\frac{1^3}{6} - \frac{1x^2}{2} + \frac{x^3}{3} \right). \quad (39)$$

Aus Abb. 8 findet man den Multiplikator

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\overline{a_0 a}}{\xi_1} = \frac{4f}{3\nu \cdot \xi_1}. \quad (40)$$

Dann erhält man für $\xi \leq 1$ (2 Lastscheiben (Gl. (36) und (38))

$$\begin{aligned} \max Q_p &= p \left\{ \frac{1}{2l} (\xi_1 - x) (2l - \xi_1 - x) - \frac{3\nu}{4fl} \left[\frac{1}{2} (\xi_1^2 - x^2) - \frac{1}{3} (\xi_1^3 - x^3) \right] \frac{4f}{3\nu \xi_1} \right\} \\ &= \frac{p}{6l \xi_1} [(3l - \xi_1) \xi_1 - (3l + a)x + 2x^2] (\xi_1 - x). \quad (41) \end{aligned}$$

Nun ist ein Ausdruck für ξ_1 zu suchen. Aus der Parabelgleichung der Kabelachse

$$y = \frac{4fx}{l^2} (l - x)$$

findet man

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{4f}{l^2} (l - 2x). \quad (42)$$

Das gibt mit Gl. (40)

$$\xi_1 = \frac{l^2}{3\nu(l - 2x)}. \quad (43)$$

Setzt man diesen Wert in die Gl. (41) ein, so erhält man

$$\begin{aligned} \max Q_p'' &= \frac{pl}{2} \left[-2 \frac{x}{l} + (3\nu + 1) \left(\frac{x}{l} \right)^2 - 8\nu \left(\frac{x}{l} \right)^3 + 4\nu \left(\frac{x}{l} \right)^4 \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3\nu \left(1 - 2 \frac{x}{l} \right)} - \frac{1}{27\nu^2 \left(1 - 2 \frac{x}{l} \right)^2} \right]. \quad (44) \end{aligned}$$

Bei 1 Lastscheibe wird (Gl. (37) und (39))

$$\max Q_p' = \frac{pl}{2} \left[4\nu \left(\frac{x}{l} \right)^4 - 8\nu \left(\frac{x}{l} \right)^3 + (1 + 3\nu) \left(\frac{x}{l} \right)^2 - 2(1 - \nu) \frac{x}{l} + 1 - \nu \right] \quad (45)$$

Die halbe $\max Q_p$ -Fläche erhält man durch Integration von $\max Q_p''$ in den Grenzen von $x = 0$ bis $x_{\xi=1}$ und von $\max Q_p'$ in den Grenzen von $x_{\xi=1}$ bis $x = l/2$. Aus Gl. (43) findet man

$$x_{\xi=1} = \frac{l}{2} \left(1 - \frac{1}{3\nu} \right).$$

Nach Ausführung der Integration und Verdoppelung für den ganzen Träger wird

$$\begin{aligned} \max Q_p\text{-Fläche} & \\ &= \frac{1}{6\nu^2} [0,15\nu^3 + (-5,30916 + \ln 1000\nu)\nu + 0,1111 - 1,25\nu^2] pl^2. \quad (46) \end{aligned}$$

In der Abb. 9 ist die max Q_p -Fläche zeichnerisch dargestellt. Wie bei den max M_p -Flächen wurde die flache Kurve für die

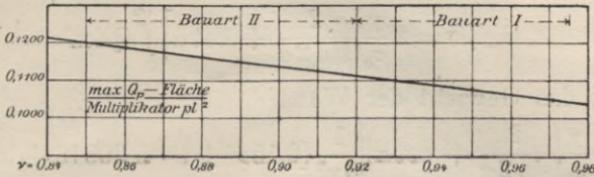


Abb. 9.

beiden Bauarten I und II durch Gerade ersetzt, deren Gleichungen lauten: für die Bauart I

$$\max Q_p\text{-Fläche} = (-0,1193\nu + 0,2207) pl^2, \quad (47)$$

für die Bauart II

$$\max Q_p\text{-Fläche} = (-0,1295\nu + 0,2301) pl^2. \quad (48)$$

β) Temperatur. Aus der Gl. (34) folgt mit $Q_0 = 0$

$$Q_t = H_t \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (49)$$

Den Wert für $\operatorname{tg} \alpha$ aus (Gl. (42)) eingesetzt, gibt

$$Q_t = H_t \cdot \frac{4f}{1^2} (1 - 2x). \quad (50)$$

Der Inhalt der aus 2 Dreiecken bestehenden Q_t -Fläche ist, wenn man noch für H_t den Wert der Gl. (24) einsetzt

$$2 \int_0^{1/2} Q_t \cdot dx = 2 H_t \cdot \frac{4f}{1^2} \int_0^{1/2} (1 - 2x) dx = 2 H_t \cdot f$$

oder

$$Q_t\text{-Fläche} = \frac{g/p + \nu}{4 \left[\frac{\sigma_k}{\alpha E_k \cdot t (1 - \nu) \sqrt{1 + 16 f^2 / l^2}} - 1 \right]} pl^2. \quad (51)$$

Diese Gleichung weist dieselbe Gestalt auf wie die Gl. (25) der M_t -Fläche; man erhält deshalb für die angenäherte Gl. entsprechend Gl. (26)

$$Q_t\text{-Fläche} = 3 (1 - \nu) (0,0185 g/p + 0,0170) pl^2. \quad (52)$$

c) Gewichtsformeln. Die theoretischen Wandgewichte ergeben sich durch Einsetzen der $2 \int_0^{1/2} Q dx$, Gl. (46) und (51), in

die Gl. (30). Es war

$$Q = \max Q = \max Q_p + Q_t$$

$$G_{d+v} = 2 \frac{\gamma}{\sigma_0} \left[\frac{2}{\sin 2\alpha} + \cot \alpha \right] \int_0^{l/2} Q dx.$$

Dann ist das Gewicht der Wand (53)

$$G_{d+v} = \frac{\gamma}{\sigma_0} \left(\frac{2}{\sin 2\alpha} + \cot \alpha \right) \left\{ \frac{1}{6\nu^2} [0,15\nu^3 + (-5,30916 + \ln 1000\nu)\nu + 0,11111 - 1,25\nu^2] + \frac{g/p + \nu}{4 \left[\frac{\sigma_k}{\alpha E_k t (1-\nu)} \sqrt{1 + 16 f^2/l^2} - 1 \right]} \right\} pl^2.$$

Für $\alpha = 45^\circ$ ist

$$\frac{2}{\sin 2\alpha} + \cot \alpha = 3.$$

3. Der Beiwert der Bogenkrafteinflußfläche.

Der Beiwert ν der parabelförmigen H-Linie wird (die Ableitung wird bei der Bauart II gegeben) dargestellt durch die Gl.

$$\nu = \frac{1}{1 + \frac{15 h^2 s_0 E_0 F_0}{16 f^2 l E_k F_k}} \quad (54)$$

Das Verhältnis E_0/E_k wird gleich 1 gesetzt.⁴⁾ Unter den durch die Abb. 10 veranschaulichten Annahmen ist⁵⁾

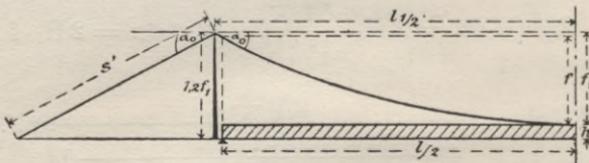


Abb. 10.

$$s_0/l = l_1/l (1 + 8 f_1^2/l_1^2) + 2 s'/l \cos^2 \alpha. \quad (55)$$

Bei diesen Ermittlungen, bei denen die Kabellänge vorkommt, soll zwischen der Pilonenentfernung und der Stützweite des Trägers unterschieden und entsprechend die Pfeilhöhen f und f_1 eingeführt werden. Für l_1/l wird ein fester Wert 1,01 angenommen, f_1/f ist dann 1,02.

4) Bohny, Theorie und Konstruktion versteifter Hängebrücken S. 84.
 5) " " " " " " " " S. 20.

Der in der Gl. (54) für ν enthaltene Wert F_0/F_k (größter Gurt- durch Kabelquerschnitt), der weiterhin ermittelt wird, ist selbst wieder abhängig von ν , so daß man eine Gleichung dritten Grades von ν erhält. Da sich deren Wurzeln nicht einfach darstellen lassen, wurde die Größe l/f , die in der 2. und 4. Potenz vorkommt, explizit entwickelt und somit ν indirekt ermittelt. Da f/h nur in der 1. Potenz vorkommt, könnte man glauben, es wäre einfacher, diesen Wert explizit darzustellen. Man erhält jedoch weniger flache Kurven als für l/f und müßte deshalb mehr Punkte ausrechnen.

Zunächst soll Gl. (55) auf eine einfachere Form gebracht werden. Aus der Abb. 10 ergibt sich

$$s' = 1,2 f_1 / \sin \alpha_0.$$

Aus der Parabelform des Kabels folgt

$$\frac{1}{\sin \alpha_0} = \frac{\sqrt{l_1^2 + 16 f_1^2}}{4 f_1} \quad \text{und} \quad \frac{1}{\cos \alpha_0} = \frac{\sqrt{l_1^2 + 16 f_1^2}}{l_1},$$

also

$$\frac{2 s'}{l \cos^2 \alpha_0} = 0,6 \frac{l_1}{l} (1 + 16 f_1^2 / l_1^2)^{3/2}.$$

Der Ausdruck $(1 + 16 f_1^2 / l_1^2)^{3/2}$ ist genau für $l_1/f_1 = 10$, von geringer Abweichung für die Nachbarwerte, die praktisch in Frage kommen, gleich $1 + 25,453 f_1^2 / l_1^2$, so daß Gl. (55), wenn noch $l_1/l = 1,01$ gesetzt wird, die Form erhält

$$s_0/l = 1,616 (1 + 14,8 f^2/l^2). \quad (56)$$

Der Gurtquerschnitt F_0 hat den Wert³⁾

$$F_0 = \frac{3 p l^2}{32 h \sigma_0} \left[\frac{1}{\nu^2} \left(\nu - \frac{4}{9} \right)^3 + 1 - \nu \right] + \frac{3 H_t \cdot f}{4 h \cdot \sigma_0},$$

für H_t der Wert der Gl. (21) eingesetzt,

$$F_0 = \frac{3 p l^2}{32 h \sigma_0} \left[\frac{1}{\nu^2} \left(\nu - \frac{4}{9} \right)^3 + 1 - \nu \right] + \frac{3 a E_k \cdot t F_k (1 - \nu) f}{4 h \cdot \sigma_0}. \quad (57)$$

Durch Division der Gleichungen (57) und (23) erhält man

$$\frac{F_0}{F_k} = \frac{3 f}{4 h \sigma_0} \left[\frac{\left[\frac{1}{\nu^2} \left(\nu - \frac{4}{9} \right)^3 + 1 - \nu \right] [\sigma_k - a E t (1 - \nu) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2}]}{(g/p + \nu) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2}} + a E t (1 - \nu) \right] \quad (58)$$

Setzt man nun in die ν -Gleichung (59) die Werte für s_0/l Gl. (56) und F_0/F_k Gl. (58) ein, löst nach l/f auf, so erhält man, wenn noch gesetzt wird $\sqrt{1 + 16 f^2/l^2} = 1 + 7,7 f^2/l^2$, — genau für

$l/f = 10$, von geringer Abweichung für die Nachbarwerte —:

$$l/f = \sqrt{\frac{7,4N_1[\sigma_k - \alpha Et(1-\nu)] + 11,25\alpha Et - 3,85[0,88\sigma_0 f/h 1/\nu + \alpha Et(1-\nu)N_1]}{0,88\sigma_0 f/h 1/\nu - \alpha Et - N_1[\sigma_k - \alpha Et(1-\nu)]}} + \sqrt{A^2 + \frac{114\alpha Et[1 - (1-\nu)N_1]}{0,88\sigma_0 f/h 1/\nu - \alpha Et - N_1[\sigma_k - \alpha Et(1-\nu)]}} \quad (59)$$

Hierin bedeutet

$$N_1 = \frac{1/\nu^2(\nu - 4/9)^3 + 1 - \nu}{(g/p + \nu)(1 - \nu)}$$

Von den 4 Wurzeln kommt nur eine in Betracht, zwei sind imaginär und eine negativ. In der Gleichung (59) kommen außer ν die Größen vor: l/f , f/h , g/p , σ_0 , σ_k , α , E , t , deren Bedeutung vorher angegeben und durch die Wahl üblicher Bezeichnung geläufig ist. Bei der zahlenmäßigen Ausmittlung werden außer α , E und t auch σ_0 und σ_k konstant angenommen, da sonst die Zahl der Kombinationen eine zu große wird. Es wird angenommen (s. I. Grundlegende Annahmen)

$$\sigma_0 = 2,5 t/qcm; \quad \sigma_k = 5 t/qcm; \quad \alpha Et = 1 \begin{cases} \alpha = 0,000012 \\ E = 2150 t/qcm. \\ t = 38,8^\circ C \end{cases}$$

Ermittelt wurde ν für die Werte:

$$l/f = 8; 9; 10; 11; 12; 13.$$

$$f/h = 3; 4; 5; 6.$$

$$g/p = 1/2; 1; 2; 3.$$

Die indirekte Ermittlung von ν wurde zeichnerisch so vorgenommen, daß Gl. (59) als eine Schar ebener Kurven $l/f = f(\nu)$ mit den Parametern f/h und g/p dargestellt wurde (Abb. 12). Da nur l/f -Werte zwischen 8 und 13 in Betracht kommen, bei denen ν nur wenig schwankt, wäre es schwierig bei der verwickelten Gestalt der Gl. (64) gewesen, passende Werte ν zu nehmen (für bestimmte f/h und g/p). Da zeigte sich bei der Ausmittlung, daß der Nenner der Gl. (59) in den Grenzen von 0,5 und 1 schwankte, was eine wesentliche Erleichterung herbeiführte. Der Nenner der Gl. (59) lautete:

$$N = (0,88\sigma_0 f/h 1/\nu - \alpha Et) - N_1[\sigma_k - \alpha tE(1 - \nu)] \\ = (2,2f/h 1/\nu - 1) - N_1(4 + \nu); \quad (60)$$

$$N_1 = \frac{1/\nu^2(\nu - 4/9)^3 + 1 - \nu}{(g/p + \nu)(1 - \nu)}$$

Übersicht 1. ν -Werte (10000 ν).

		$g/p = 1/2$						$g/p = 1$					
$l/f =$		8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13
$f/h =$	3	8554	8598	8628	8650	8668	8680	9011	9029	9043	9056	9096	9078
	4	9040	9059	9074	9088	9098	9108	9313	9330	9342	9353	9360	9366
	5	9278	9295	9309	9319	9324	9329	9480	9490	9501	9509	9512	9516
	6	9425	9438	9450	9460	9468	9472	9580	9590	9598	9602	9605	9608

		$g/p = 2$						$g/p = 3$					
$l/f =$		8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13
$f/h =$	3	9370	9385	9398	9408	9413	9420	9541	9551	9560	9565	9571	9576
	4	9561	9571	9580	9586	9590	9592	9678	9684	9690	9694	9698	9700
	5	9664	9671	9677	9680	9683	9684	9751	9757	9761	9765	9768	9769
	6	9730	9735	9739	9741	9741	9743	9800	9805	9809	9810	9811	9812

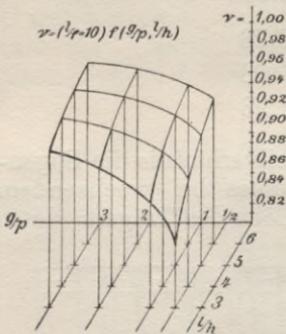


Abb. 13.

Um ein anschaulicheres Bild, als Abb. 12 bietet von der Veränderlichkeit von ν zu geben, wurde in Abb. 13 $\nu = f(g/p, f/h)$ axonometrisch dargestellt; l/f wurde konstant zu 10 angenommen; die für die Nachbarwerte gezeichneten Flächen würden nur wenig abweichen.

4. Zahlenmäßige Ermittlung der theoretischen Hauptträgergewichte.

In vorstehendem sind für bestimmte Werte von g/p , l/f und f/h die Größen des Beiwertes ν der H-Fläche berechnet worden (Übersicht I). Mit deren Benutzung sind für dieselben Werte von g/p , l/f und f/h die theoretischen Hauptträgergewichte, Gurte nach Gl. (27), die Wand nach Gl. (53), berechnet worden. Die Ergebnisse sind, Verkehr- und Temperatureinfluß getrennt, in den Übersichten 2 bis 10 angegeben.

Theoretische Hauptträgergewichte (Bauart I).

Übersicht 2. Gurte.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 \text{ pl}^2$. $g/p = 1/2$

f/h =	4						5						6					
	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10
GP	1,1814	1,2817	1,3887	1,0274	1,1498	1,2718	1,3930	1,5156	1,6369	1,1994	1,3428	1,4860	1,6298	1,7748	1,9788	1,5454	1,7110	
G ^t	0,2221	0,2370	0,2526	0,1643	0,1774	0,1910	0,2045	0,2186	0,2325	0,1562	0,1680	0,1810	0,1931	0,2071	0,1503	0,1618	0,1732	
G	1,4035	1,5187	1,6363	1,1917	1,3272	1,4628	1,5975	1,7342	1,8694	1,3556	1,5108	1,6670	1,8229	1,9819	1,5291	1,7072	1,8842	

Übersicht 3. Gurte.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 \text{ pl}^2$. $g/p = 1$

f/h =	4						5						6					
	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10
GP	1,0549	1,1467	1,2393	0,9498	1,0632	0,1772	1,2908	1,4052	1,5196	1,1303	1,2679	1,4041	1,5409	1,6795	1,8167	1,4788	1,6367	
G ^t	0,2149	0,2290	0,2440	0,1607	0,1726	0,1854	0,1982	0,2119	0,2257	0,1528	0,1650	0,1766	0,1889	0,2028	0,1485	0,1596	0,1712	
G	1,2698	1,3757	1,4833	1,1105	1,2358	1,3626	1,4890	1,6171	1,7453	1,2831	1,4329	1,5807	1,7298	1,8823	1,4652	1,6364	1,8079	

Übersicht 4. Gurte.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 \text{ pl}^2$. $g/p = 2$

f/h =	4						5						6					
	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10
GP	0,9523	1,0375	1,1218	0,8626	0,9901	1,0972	1,2047	1,3126	1,4211	1,0698	1,2011	1,3322	1,4640	1,5960	1,2587	1,4138	1,5690	
G ^t	0,2064	0,2211	0,2349	0,1563	0,1682	0,1800	0,1929	0,2064	0,2208	0,1497	0,1614	0,1733	0,1866	0,2003	0,1445	0,1562	0,1691	
G	1,1587	1,2586	1,3567	1,0389	1,1583	1,2772	1,3976	1,5190	1,6419	1,2195	1,3625	1,5055	1,6506	1,7963	1,4032	1,5700	1,7381	

Übersicht 5. Gurte.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 \text{ pl}^2$. $g/p = 3$

f/h =	3						4						5						6					
	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10
GP	0,9092	0,9901	1,0709	0,3523	0,9568	1,0614	1,1663	1,2709	1,3760	1,0421	1,1702	1,2986	1,4267	1,5548	1,2319	1,3698	1,5358							
Gt	0,2053	0,2167	0,2303	0,1535	0,1658	0,1778	0,1908	0,2035	0,2174	0,1484	0,1594	0,1715	0,1833	0,1955	0,1430	0,1536	0,1645							
G	1,1125	1,2068	1,3012	1,0058	1,1226	1,2392	1,3571	1,4744	1,5934	1,1905	1,3296	1,4701	1,6100	1,7503	1,3749	1,5374	1,7003							

Übersicht 6. Wand.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 \text{ pl}^2$. $g/p = 1/2$

f/h =	3						4						5						6					
	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10
GP	0,3544	0,3537	0,3532	0,3391	0,3384	0,3378	0,3373	0,3369	0,3365	0,3304	0,3297	0,3291	0,3287	0,3285	0,3249	0,3244	0,3239							
Gt	0,0303	0,0296	0,0291	0,0231	0,0222	0,0215	0,0209	0,0205	0,0201	0,0176	0,0168	0,0163	0,0158	0,0155	0,0141	0,0135	0,0130							
G	0,3847	0,3833	0,3823	0,3622	0,3606	0,3593	0,3582	0,3574	0,3566	0,3479	0,3465	0,3454	0,3445	0,3440	0,3390	0,3379	0,3369							

Übersicht 7. Wand.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 \text{ pl}^2$. $g/p = 1$

f/h =	3						4						5						6					
	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10
GP	0,3335	0,3330	0,3377	0,3289	0,3283	0,3279	0,3275	0,3272	0,3270	0,3229	0,3226	0,3221	0,3219	0,3218	0,3193	0,3190	0,3187							
Gt	0,0293	0,0286	0,0282	0,0226	0,0216	0,0209	0,0203	0,0199	0,0195	0,0172	0,0165	0,0159	0,0155	0,0152	0,0139	0,0133	0,0128							
G	0,3678	0,3666	0,3659	0,3515	0,3499	0,3488	0,3478	0,3471	0,3465	0,3401	0,3391	0,3380	0,3374	0,3370	0,3352	0,3323	0,3315							

Übersicht 8. Wand.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 \text{ pl}^2$.

$g/p = 2$

f/h =	3						4						5						6							
	11	12	13	8	9	10	10	11	12	13	8	9	10	10	11	12	13	8	9	10	10	11	12	13	8	9
GP	0,3255	0,3253	0,3251	0,3200	0,3196	0,3193	0,3191	0,3190	0,3189	0,3164	0,3161	0,3159	0,3158	0,3157	0,3141	0,3139	0,3138									
G ^t	0,0281	0,0276	0,0271	0,0220	0,0210	0,0208	0,0197	0,0194	0,0191	0,0168	0,0161	0,0156	0,0153	0,0150	0,0135	0,0130	0,0127									
G	0,3536	0,3529	0,3522	0,3420	0,3406	0,3396	0,3388	0,3384	0,3380	0,3332	0,3322	0,3315	0,3311	0,3307	0,3276	0,3269	0,3265									

Übersicht 9. Wand.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 \text{ pl}^2$.

$g/p = 3$

f/h =	3						4						5						6							
	11	12	13	8	9	10	10	11	12	13	8	9	10	10	11	12	13	8	9	10	10	11	12	13	8	9
GP	0,3199	0,3196	0,3194	0,3158	0,3157	0,3155	0,3153	0,3152	0,3151	0,3133	0,3131	0,3130	0,3128	0,3127	0,3117	0,3115	0,3113									
G ^t	0,0277	0,0271	0,0266	0,0216	0,0207	0,0200	0,0195	0,0191	0,0188	0,0167	0,0160	0,0154	0,0150	0,0147	0,0134	0,0128	0,0124									
G	0,3476	0,3467	0,3460	0,3374	0,3364	0,3355	0,3348	0,3343	0,3339	0,3300	0,3291	0,3284	0,3278	0,3274	0,3251	0,3243	0,3237									

Übersicht 10. Gurte + Wand.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 \text{ pl}^2$.

f/h =	3						4						5						6							
	11	12	13	8	9	10	10	11	12	13	8	9	10	10	11	12	13	8	9	10	10	11	12	13	8	9
¹ / ₂	1,788	1,902	2,019	1,554	1,688	1,822	1,956	2,092	2,226	1,704	1,857	2,012	2,167	2,326	1,868	2,045	2,221									
¹ / ₁	1,638	1,742	1,849	1,462	1,586	1,711	1,837	1,964	2,092	1,623	1,772	1,919	2,067	2,219	1,798	1,969	2,139									
$g/p = 2$	1,512	1,612	1,709	1,381	1,499	1,617	1,736	1,857	1,980	1,553	1,695	1,837	1,982	2,127	1,731	1,897	2,065									
³ / ₃	1,460	1,554	1,647	1,343	1,459	1,575	1,692	1,809	1,927	1,521	1,659	1,799	1,938	2,078	1,700	1,862	2,024									

Die in Übersicht 10 enthaltenen Gewichte sind in der Abb. 14 benutzt worden, um für die Werte l/h von 35 bis 60 die Hauptträgergewichte zeichnerisch zu ermitteln.

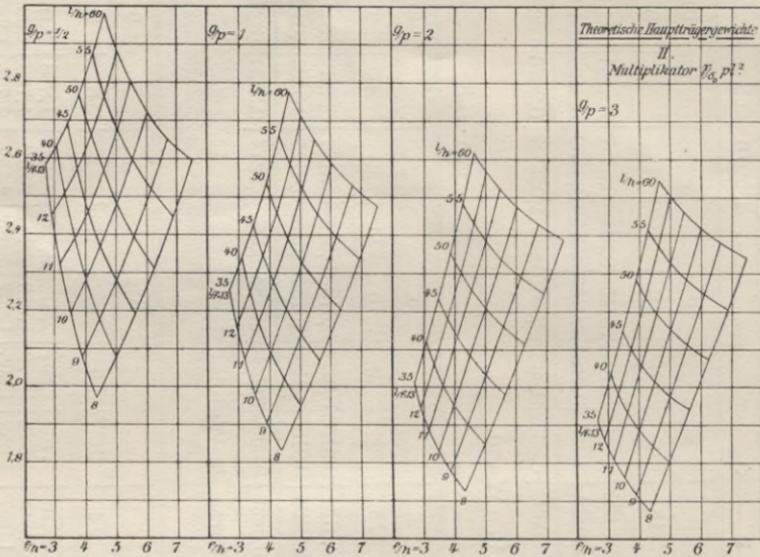


Abb. 14.

Die in Abb. 14 erhaltenen Werte sind in den Übersichten 11—14 zusammengestellt.

Übersicht 11. Theoretische Hauptträgergewichte.
Multiplikator $\gamma/\sigma_0 \text{ pl}^2$.

$g/p =$		$1/2$						1					
$l/h =$		8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13
$l/h =$	35	1,61	1,67	1,74	1,81	1,89	1,97	1,52	1,57	1,61	1,67	1,73	1,78
	40	1,70	1,76	1,82	1,89	1,96	2,03	1,62	1,67	1,71	1,76	1,81	1,86
	45	1,80	1,86	1,91	1,97	2,04	2,11	1,73	1,77	1,81	1,86	1,90	1,95
	50	1,91	1,96	2,01	2,07	2,13	2,20	1,85	1,88	1,92	1,96	2,00	2,05
	55	2,02	2,07	2,11	2,17	2,22	2,29	1,96	1,99	2,03	2,07	2,11	2,15
	60	2,14	2,18	2,22	2,27	2,32	2,38	2,08	2,01	2,14	2,18	2,12	2,26

$g/p =$		2						3					
$l/h =$		8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13
$l/h =$	35	1,45	1,48	1,51	1,55	1,59	1,63	1,41	1,44	1,47	1,50	1,53	1,56
	40	1,55	1,59	1,62	1,65	1,69	1,73	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,67
	45	1,66	1,70	1,73	1,76	1,79	1,83	1,63	1,66	1,69	1,72	1,75	1,78
	50	1,78	1,81	1,84	1,87	1,90	1,94	1,75	1,77	1,80	1,83	1,86	1,89
	55	1,89	1,92	1,95	1,98	2,01	2,05	1,86	1,89	1,91	1,94	1,97	2,00
	60	2,01	2,03	2,07	2,09	2,02	2,16	1,97	2,00	2,02	2,05	2,08	2,11

In der Abb. 15 sind die theoretischen Hauptträgerrgewichte für $l/f = 10$ als $f(g/p, l/h)$ axonometrisch dargestellt. Für die übrigen Werte l/f würden sich wenig verschiedene Flächen ergeben. Die Werte wachsen mit l/h , fallen mit g/p .

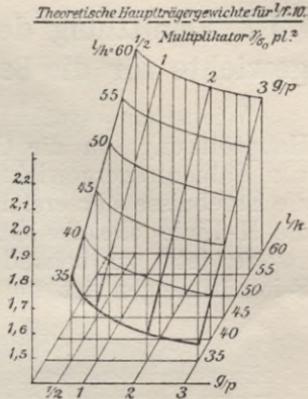


Abb. 15.

5. Näherungsformeln.

An Stelle der verwickelten Form der ν -Gleichung (59) soll eine einfachere Näherungsgleichung gefunden werden. Die ν -Werte nähern sich der Grenze 1 die Gleichung muß also die Asymptote 1 besitzen. Dieser Bedingung entspricht, innerhalb der Gebrauchswerte von ν bis auf ein $1/2$ Hundertstel genau, die Gleichung

$$\nu = 1 - \frac{1}{0,1013 \cdot (l/f)^{0,189} (l/h)^{1,24} (g/p)^{0,630}} \quad (61)$$

Setzt man diesen Wert in die angenäherten Gewichtsgleichungen (17), (26), (47) und (52) ein, so erhält man

$$G_{o+u} = 2l/h \left[0,01195 + \frac{0,0590 + 0,0185 g/p}{0,1013 (l/f)^{0,189} (l/h)^{1,24} (g/p)^{0,63}} \right] \frac{\gamma}{\sigma_0} pl^2 \quad (62)$$

$$G_{d+v} = \left(\frac{2}{\sin 2\alpha} + \cot \alpha \right) \left[0,1014 + \frac{0,1703 + 0,0555 g/p}{0,1013 (l/f)^{0,189} (l/h)^{1,24} (g/p)^{0,63}} \right] \frac{\gamma}{\sigma_0} pl^2 \quad (63)$$

$$\text{für } \alpha = 45^\circ, \text{ ist } \left(\frac{2}{\sin 2\alpha} + \cot \alpha \right) = 3.$$

Durch Addition der beiden Gl. (62) und (63) wird das theoretische Hauptträgerrgewicht

$$G = \left[0,023901/h + 0,3042 + \frac{2l/h(0,0590 + 0,0185 g/p) + 3(0,1703 + 0,0555 g/p)}{0,1013 (l/f)^{0,189} (l/h)^{1,24} (g/p)^{0,63}} \right] \frac{\gamma}{\sigma_0} pl^2 \quad (64)$$

III. Ermittlung der theoretischen Hauptträgergewichte für die Bauart mit zwei Seitenöffnungen.

Wie schon erwähnt (I), handelt es sich hier nur um die Hauptöffnung, da die Gewichte der Seitenöffnung nur wenig von Balkenträgergewichten gleicher Stützweite abweichen. Um die Ergebnisse der ersten Bauart benutzen zu können, wird für die H-Linie dieselbe Gl. (6) angenommen. Abb. 16 stellt die zweite, jetzt zu behandelnde Bauart dar. Die Stützweite der Seitenöffnungen ist halb so groß wie die der Mittelöffnung,

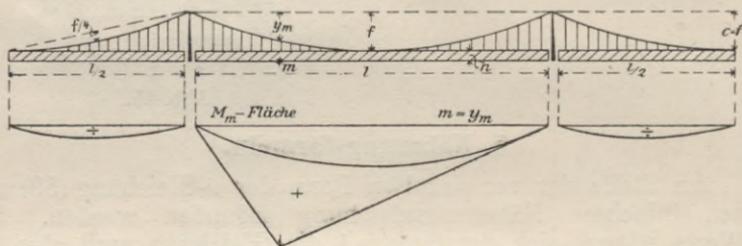


Abb. 16. u. 17.

die Pfeilhöhe ein Viertel. Da bei diesem System die Bogenkraft kleiner ist als bei dem zuerst behandelten, wird der Balkeneinfluß noch mehr überwiegen. Daraus folgt, daß hier ebenfalls die positiven Momente und Querkräfte der Rechnung zugrunde zu legen sind. Man erhält also für die Verkehrslast dieselben Gleichungen wie unter II. Neu zu ermitteln sind die Gleichung für den Beiwert ν der H-Fläche und die Gleichungen, in denen die Temperaturbogenkraft enthalten ist.

1. Der Beiwert der Bogenkrafteinflußfläche.

Der allgemeine Ausdruck für die Bogenkraft lautet

$$H = \frac{M_w}{\mathfrak{H}} \quad (65)$$

wobei M_w das Moment des mit den elastischen Kräften $2y dx$ (infolge $H = -1$) belasteten Trägers ist, so daß mit Gl. (3)

$$y = \frac{4fx}{l^2} (1-x)$$

wird

$$M_w = \frac{2f}{3l^2} (x^3 - 2lx^3 + x^4). \quad (66)$$

Ferner ist

$$\mathfrak{N} = 2 \int_0^1 y^2 dx + 4 \int_0^{1/2} (y/4)^2 dx + \frac{h^2 F_0}{F_k} s_0. \quad (67)$$

Der zweite Summand bezieht sich auf die Seitenöffnungen, deren Kabelordinaten gleich $1/4$ der entsprechenden Ordinaten der Mittelöffnung sind. Die beiden ersten Summanden ergeben

$$2 \int_0^1 y^2 dx + 4 \int_0^{1/2} (y/4)^2 dx = \frac{17}{15} f^2 l.$$

Für s_0 erhält man

$$s_0 = l \left[1 + 8 f^2 / l^2 \right] + 2 \frac{l}{2} \left[1 + 8 \frac{(f/4)^2}{(l/2)^2} + 1,5 \frac{f^2}{(l/2)^2} \right] = 2l \left[1 + 8 f^2 / l^2 \right] \quad (68)$$

und mit Berücksichtigung der verschiedenen Pilonenentfernung und Stützweite (s. II. 3)

$$s_0 = 2,02l \left[1 + 8,2 f^2 / l^2 \right]. \quad (69)$$

Er ist also

$$\mathfrak{N} = \frac{17}{15} f^2 l + \frac{h^2 F_0}{F_k} 2,02l \left(1 + 8,2 f^2 / l^2 \right). \quad (70)$$

Um die Ergebnisse der Ableitungen unter II für die Verkehrslast benutzen zu können, nehmen wir dieselbe Gl. (6) für die H-Linie an

$$H = \frac{3}{4} \frac{x(l-x)}{fl} \nu.$$

Der Inhalt der H-Fläche ist

$$\int H = \frac{l^2 \nu}{8f}.$$

Dieser Inhalt der parabelförmig angenommenen H-Fläche soll gleich dem Inhalt der wirklichen H-Fläche Gl. (71) sein.

$$\frac{l^2 \nu}{8f} = \int_0^1 \frac{M_w}{\mathfrak{N}} dx = \frac{1}{\mathfrak{N}} \int_0^1 \frac{2f}{3l^2} (x l^3 - 2lx^3 + x^4) dx = \frac{2fl^3}{15\mathfrak{N}}.$$

Setzt man in diese Gleichung für \mathfrak{N} den Wert aus Gl. (70) ein, so erhält man den Beiwert der H-Fläche

$$\nu = \frac{1}{\frac{17}{16} + \frac{15 h^2 s_0 F_0}{16 f^2 l F_k}} \quad (71)$$

worin s_0 den Wert der Gl. (69) darstellt.

Da der Wert F_0/F_k infolge des verschiedenen H_t sich gegen den unter II gefundenen unterscheidet, so muß H_t und F_0/F_k

gesucht werden. Der allgemeine Ausdruck für H_t lautet

$$H_t = \frac{\sum S_a \Delta s_t}{\sum S_a^2 s / EF} = \frac{\alpha Et F_c \sum S_a \cdot s}{\mathfrak{R}}, \quad (72)$$

wobei entsprechend der Gl. (70) ist

$$\mathfrak{R} = \frac{17 f^2 l}{15 h^2} + \frac{F_c \cdot s_0}{F_k}. \quad (73)$$

Für $\sum S_a s$ im Zähler der Gl. (72) findet man bei Vernachlässigung des unwesentlichen Einflusses des Trägers und der Hängeseile und für $l_1/l = 1,01$

$$\begin{aligned} \sum S_a s &= \int_0^l \sec^2 \alpha dx = l \left[1 + \frac{16 f^2}{3 l^2} \right] + 2 \frac{l}{2} \left[1 + \frac{16 (f/4)^2}{(l/2)^2} + \frac{f^2}{(l/2)^2} \right] \\ &= 2l \left[1 + \frac{16 f^2}{3 l^2} \right] = 2,02l [1 + 5,44 f^2/l^2] = s'. \end{aligned} \quad (74)$$

Durch Einsetzen der Werte der Gl. (73) und (74) in Gl. (72) wird

$$H_t = \alpha Et F_c \frac{F_k^3 s'}{F_c s_0} \frac{1}{17/15 f^2 l/h^2 + F_c s_0/F_k} = \alpha Et F_k \left(1 - \frac{17}{16} \nu \right) \quad (75)$$

wobei gesetzt wurde

$$\frac{s'}{s_0} = \frac{2,02l(1 + 5,44 f^2/l^2)}{2,02l(1 + 8,2 f^2/l^2)} = 1,$$

was vor allem in Hinblick auf die Beweglichkeit von t zulässig erscheint (für $l/f = 10$ ist $\frac{s'}{s_0} = 0,975$).

Unter II war für die Bauart I gefunden worden

$$H_t = \alpha Et F_k (1 - \nu).$$

In den unter II abgeleiteten Werten der M_t - und Q_t -Flächen, F_0/F_k wird nur an Stelle von $(1 - \nu)$ der Wert $(1 - 17/16 \nu)$ treten. Es ist also

$$F_0 = \frac{3 pl^2}{32 h \sigma_0} \left[\frac{1}{\nu^2} \left(\nu - \frac{4}{9} \right)^3 + 1 - \nu \right] + \frac{3 \alpha Et F_k (1 - 17/16 \nu) f}{4 h \sigma_0} \quad (76)$$

$$F_k = \frac{pl^2}{8f} \frac{(g/p + \nu) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2}}{\sigma_k - \alpha Et (1 - 17/16 \nu) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2}} \quad (77)$$

$$\frac{F_0}{F_k} = \frac{3 f}{4 h \sigma_0} \left\{ \frac{\left[\frac{1}{\nu^2} \left(\nu - \frac{4}{9} \right)^3 + 1 - \nu \right] \left[\sigma_k - \alpha Et \left(1 - \frac{17}{16} \nu \right) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2} \right]}{(g/p + \nu) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2}} + \alpha Et \left(1 - \frac{17}{16} \nu \right) \right\} \quad (78)$$

Setzt man nun in die ν -Gl. (71) für s_0/l und F_0/F_k die Werte der Gl. (69) und (78) ein, entwickelt nach $1/f$, so erhält man:

$$1/f = \sqrt{\frac{4,1N_1[\sigma_k - \alpha Et(1 - 17/16\nu)] + 7,95\alpha Et - 3,85[0,7\sigma_0 f/h 1/\nu + \alpha Et(1 - 17/16\nu)N_1]}{0,7\sigma_0 f/h 1/\nu - \alpha Et - N_1[\sigma_k - \alpha Et(1 - 17/16\nu)]}} \quad (79)$$

$$+ \sqrt{A^2 + \frac{64\alpha Et[1 - (1 - 17/16\nu)N_1]}{0,7\sigma_0 f/h 1/\nu - \alpha Et - N_1[\sigma_k - \alpha Et(1 - 17/16\nu)]}}$$

hierin ist

$$N_1 = \frac{1/\nu^2(\nu - 4/9)^3 + 1 - \nu}{(g/p + \nu)(1 - 17/16\nu)}$$

Die Gleichung ist nicht viel von der unter II ermittelten verschieden. Wie dort kann hier der Nenner zur annähernden Bestimmung von ν benutzt werden, seine Größe ist hier ungefähr 0,1; er ist in Abb. 18 dargestellt worden, wobei die $l/f=10$ entsprechenden Werte herausgehoben wurden.

(Die strichpunktierte Linie bezieht sich auf die Untersuchungen unter III. 5).

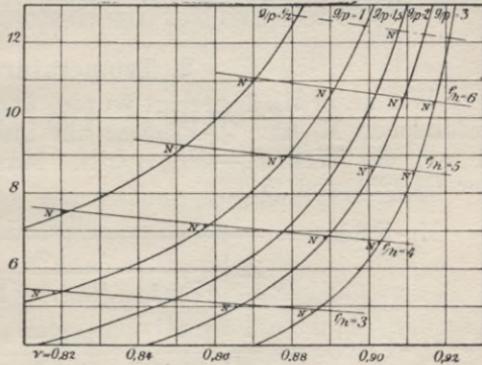


Abb. 18.

Die nächste Abb. 19 gibt dann die wirklichen ν -Werte, die außerdem noch in der Übersicht 12 gegeben werden.

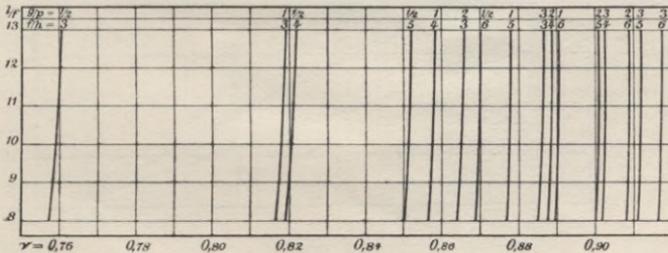


Abb. 19.

Übersicht 12. ν -Werte (10000 ν).

$g/p =$		$\frac{1}{2}$						1					
$l/f =$		8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13
$f/h =$	3	7574	7583	7590	7596	7602	7607	8165	8173	8180	8185	8188	8190
	4	8190	8198	8205	8210	8215	8219	8566	8571	8575	8579	8581	8582
	5	8501	8507	8511	8515	8518	8520	8770	8772	8773	8774	8775	8776
	6	8690	8693	8695	8697	8699	8700	8897	8899	8900	8901	8901	8902

$g/p =$		2						3					
$l/f =$		8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13
$f/h =$	3	8641	8648	8654	8657	8659	8660	8850	8856	8860	8863	8865	8866
	4	8375	8380	8383	8385	8387	8388	9020	9024	9026	9027	9028	9029
	5	9002	9005	9007	9008	9009	9010	9111	9114	9116	9117	9118	9119
	6	9082	9084	9086	9087	9088	9089	9167	9170	9171	9172	9173	9174

2. Temperatur.

Wie unter III. 1 gezeigt wurde, ändern sich die für Bauart I gefundenen M_t und Q_t -Flächen nur insofern, als an Stelle von $(1 - \nu)$ der Wert $(1 - \frac{17}{16}\nu)$ tritt. Man erhält also an Stelle der Gl. (25) und (51):

$$M_t\text{-Fläche} = \frac{g/p + \nu}{12 \left[\frac{\sigma_k}{\alpha Et (1 - \frac{17}{16}\nu)} \sqrt{1 + 16 f^2/l^2} - 1 \right]} pl^3 \quad (80)$$

$$Q_t\text{-Fläche} = \frac{g/p + \nu}{4 \left[\frac{\sigma_k}{\alpha Et (1 - \frac{17}{16}\nu)} \sqrt{1 + 16 f^2/l^2} - 1 \right]} pl^2 \quad (81)$$

In der Abb. 20 sind die M_t -Flächen für $g/p = 1; 2; 3$ und $l/f = 8; 10; 12$ aufgetragen worden. Diese Linien sind annähernd

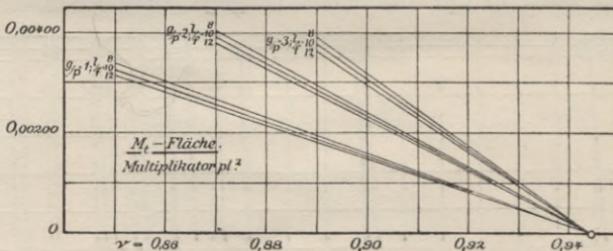


Abb. 20.

Gerade, die sich im Punkte $\frac{16}{17} = 0,9412; 0$ schneiden. Dann ist angenähert

$$M_t\text{-Fläche} = (1 - \sqrt[17]{16} \nu) (0,0182 \text{ g/p} + 0,0161) \text{ pl}^3 \quad (82)$$

$$Q_t\text{-Fläche} = 3 (1 - \sqrt[17]{16} \nu) (0,0182 \text{ g/p} + 0,0161) \text{ pl}^2 \quad (83)$$

Für die max M_p - und max Q_p -Flächen gelten dieselben Gleichungen (16, 17, 50) wie unter II. Mit Berücksichtigung der Gl. (80) und (81) erhält man für die Gurt- und Wandgewichte

$$G_{o+u} = 2l/h \left\{ 1/27 \nu^2 [4,5 \nu^3 - 13,5 \nu^2 - 56,77 \nu + (9 \nu + 1) \ln 1000 \nu - 2,979] + \frac{1-\nu}{12} + \frac{\text{g/p} + \nu}{12 \left[\frac{\sigma_k}{\alpha E t (1 - \sqrt[17]{16} \nu) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2}} - 1 \right]} \right\} \frac{\gamma}{\sigma_0} \text{ pl}^2 \quad (84)$$

$$G_{d+v} = \left(\frac{2}{\sin 2\alpha} + \cot \alpha \right) \left\{ \frac{1}{6 \nu^2} [0,15 \nu^3 + (-5,309 16 + \ln 1000 \nu) \nu + 0,1111 - 1,25 \nu^2] + \frac{\text{g/p} + \nu}{4 \left[\frac{\sigma_k}{\alpha E t (1 - \sqrt[17]{16} \nu) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2}} - 1 \right]} \right\} \frac{\gamma}{\sigma_0} \text{ pl}^2 \quad (85)$$

für $\alpha = 45^\circ$ wird $\left(\frac{2}{\sin 2\alpha} + \cot \alpha \right) = 3$.

3. Zahlenmäßige Ermittlung der theoretischen Hauptträgergewichte.

(Bauart II.)

Wie bei der Bauart I werden für verschiedene Werte von g/p , l/f und l/h in den folgenden Übersichten und Abbildungen die theoretischen Hauptträgergewichte gegeben.

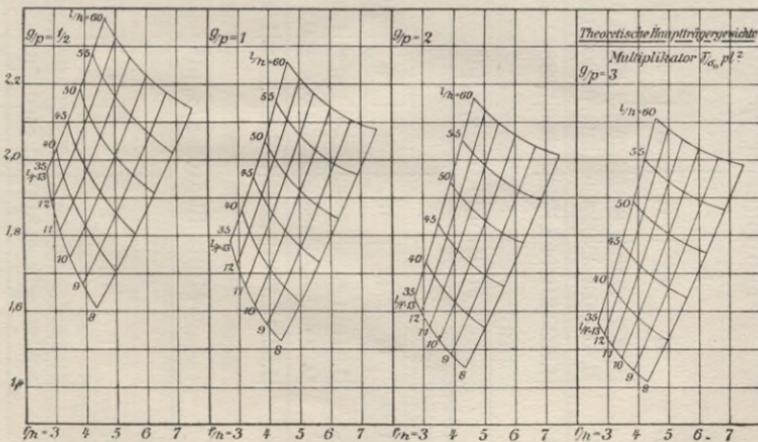


Abb. 21.

Übersicht 13. Gurte.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 \text{ pl}^2$		$g/p = 1/2$																
f/h =	1/f =	3			4			5			6							
		11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	8	9	10
G ^p		1,5622	1,7019	1,8413	1,2993	1,4587	1,6177	1,7773	1,9363	2,0955	1,4936	1,6775	1,8615	2,0451	2,2295	1,7004	1,9113	2,1228
G ^t		0,3004	0,3195	0,3425	0,2103	0,2300	0,2501	0,2706	0,2912	0,3121	0,1990	0,2177	0,2370	0,2564	0,2761	0,1910	0,2095	0,2284
G		1,8626	2,0214	2,1838	1,5096	1,6887	1,8678	2,0479	2,2275	2,4076	1,6926	1,8952	2,0985	2,3015	2,5056	1,8914	2,1208	2,3512

Übersicht 14. Gurte.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 \text{ pl}^2$		$g/p = 1$																
f/h =	1/f =	3			4			5			6							
		11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	8	9	10
G ^p		1,3418	1,4625	1,5836	1,1730	1,3177	1,4625	1,6069	1,7520	1,8976	1,3864	1,5589	1,7315	1,9041	2,0770	1,6059	1,8057	2,0057
G ^t		0,2853	0,3076	0,3302	0,2031	0,2222	0,2418	0,2614	0,2819	0,3026	0,1937	0,2126	0,2321	0,2518	0,2717	0,1872	0,2053	0,2240
G		1,6271	1,7701	1,9138	1,3761	1,5399	1,7043	1,8683	2,0329	2,2002	1,5801	1,7715	1,9636	2,1559	2,3487	1,7931	2,0110	2,2297

Übersicht 15. Gurte.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 \text{ pl}^2$		$g/p = 2$																
f/h =	1/f =	3			4			5			6							
		11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	8	9	10
G ^p		1,1789	1,2852	1,3917	1,0772	1,2102	1,3434	1,4770	1,6100	1,7438	1,2985	1,4597	1,6210	1,7824	1,9440	1,5226	1,7118	1,9005
G ^t		0,2736	0,2949	0,3167	0,1989	0,2169	0,2358	0,2554	0,2748	0,2949	0,1901	0,2077	0,2260	0,2450	0,2641	0,1837	0,2011	0,2185
G		1,4525	1,5801	1,7084	1,2761	1,4271	1,5792	1,7324	1,8848	2,0387	1,4886	1,6674	1,8470	2,0274	2,2081	1,7063	1,9129	2,1193

Übersicht 16. Gurte.

Multiplikator $\gamma/\sigma, pl^2$ $g/p = 3$

f/h =	3			4			5			6							
	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10					
1/f =	1,1147	1,2154	1,3163	1,0336	1,1614	1,2896	1,4180	1,5464	1,6747	1,2577	1,4140	1,5701	1,7266	1,8829	1,4852	1,6668	1,8539
G _p	0,2686	0,2892	0,3103	0,1955	0,2130	0,2318	0,2512	0,2707	0,2904	0,1877	0,2046	0,2222	0,2406	0,2591	0,1833	0,1994	0,2171
G _t	1,3838	1,5046	1,6266	1,2291	1,3744	1,5214	1,6692	1,8171	1,9651	1,4454	1,6186	1,7923	1,9672	2,1420	1,6685	1,8662	2,0710

Übersicht 17. Wand.

Multiplikator $\gamma/\sigma, pl^2$ $g/p = 1/2$

f/h =	3			4			5			6							
	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10					
1/f =	0,3995	0,3992	0,3990	0,3732	0,3729	0,3726	0,3724	0,3722	0,3721	0,3604	0,3602	0,3600	0,3598	0,3597	0,3528	0,3527	0,3526
G _p	0,0410	0,0399	0,0395	0,0296	0,0288	0,0281	0,0277	0,0273	0,0270	0,0224	0,0218	0,0213	0,0210	0,0207	0,0179	0,0175	0,0171
G _t	0,4405	0,4591	0,4335	0,4028	0,4017	0,4007	0,4001	0,3995	0,3991	0,3828	0,3820	0,3813	0,3808	0,3804	0,3707	0,3702	0,3697

Übersicht 18. Wand.

Multiplikator $\gamma/\sigma, pl^2$ $g/p = 1$

f/h =	3			4			5			6							
	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10					
1/f =	0,3735	0,3734	0,3733	0,3578	0,3576	0,3574	0,3572	0,3572	0,3571	0,3496	0,3495	0,3495	0,3495	0,3494	0,3446	0,3445	0,3445
G _p	0,0889	0,0885	0,0881	0,0286	0,0278	0,0272	0,0267	0,0264	0,0262	0,0218	0,0213	0,0209	0,0206	0,0204	0,0176	0,0171	0,0168
G _t	0,4124	0,4119	0,4114	0,3864	0,3854	0,3846	0,3839	0,3836	0,3833	0,3714	0,3708	0,3704	0,3701	0,3698	0,3622	0,3616	0,3613

Übersicht 19. Wand.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 p l^2$ $g/p = 2$

f/h =	3						4						5						6						
	11	12	13	8	9	10	10	11	12	13	8	9	10	9	10	11	12	8	9	10	11	12	8	9	10
$1/f =$	0,3541	0,3540	0,3510	0,3455	0,3453	0,3452	0,3452	0,3451	0,3450	0,3450	0,3406	0,3405	0,3404	0,3404	0,3404	0,3403	0,3403	0,3376	0,3375	0,3374	0,3374	0,3374	0,3374	0,3374	0,3374
G_p	0,0373	0,0369	0,0365	0,0280	0,0271	0,0265	0,0261	0,0258	0,0255	0,0254	0,0214	0,0208	0,0203	0,0200	0,0198	0,0172	0,0163	0,0164	0,0163	0,0164	0,0164	0,0164	0,0164	0,0164	0,0164
G	0,3914	0,3909	0,3905	0,3785	0,3724	0,3717	0,3712	0,3708	0,3705	0,3620	0,3713	0,3607	0,3604	0,3601	0,3548	0,3543	0,3538	0,3538	0,3538	0,3538	0,3538	0,3538	0,3538	0,3538	0,3538

Übersicht 20. Wand.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 p l^2$ $g/p = 3$

f/h =	4						5						6											
	11	12	13	8	9	10	10	11	12	13	8	9	10	9	10	11	12	8	9	10				
$1/f =$	0,3459	0,3458	0,3458	0,3399	0,3398	0,3397	0,3397	0,3396	0,3396	0,3364	0,3363	0,3362	0,3362	0,3343	0,3342	0,3342	0,3342	0,3342	0,3342	0,3342	0,3342	0,3342	0,3342	0,3342
G_p	0,0366	0,0361	0,0358	0,0275	0,0266	0,0261	0,0257	0,0254	0,0251	0,0211	0,0205	0,0197	0,0194	0,0172	0,0163	0,0163	0,0163	0,0163	0,0163	0,0163	0,0163	0,0163	0,0163	0,0163
G	0,3825	0,3819	0,3816	0,3674	0,3664	0,3658	0,3654	0,3654	0,3647	0,3575	0,3568	0,3556	0,3556	0,3515	0,3505	0,3505	0,3505	0,3505	0,3505	0,3505	0,3505	0,3505	0,3505	0,3505

Übersicht 21. Gurte + Wand.

Multiplikator $\gamma/\sigma_0 p l^2$

f/h =	3						4						5						6					
	11	12	13	8	9	10	10	11	12	13	8	9	10	9	10	11	12	8	9	10	11	12	8	9
$1/f =$	2,303	2,461	2,622	1,912	2,090	2,269	2,448	2,627	2,807	2,075	2,277	2,480	2,682	2,886	2,491	2,721	2,925	3,129	2,719	2,923	3,127	2,719	2,923	3,127
G_p	1	2,040	2,182	1,763	1,925	2,089	2,252	2,418	2,584	1,952	2,142	2,331	2,526	2,719	2,155	2,373	2,591	2,809	2,988	2,155	2,373	2,591	2,809	2,988
G	2	1,814	1,971	1,650	1,800	1,951	2,104	2,256	2,409	1,851	2,039	2,208	2,388	2,568	2,061	2,267	2,473	2,671	2,869	2,061	2,267	2,473	2,671	2,869
$g/p =$	3	1,766	1,887	1,597	1,741	1,887	2,035	2,182	2,330	1,803	1,975	2,149	2,323	2,498	2,020	2,217	2,422	2,619	2,817	2,020	2,217	2,422	2,619	2,817

Die in der Übersicht 21 enthaltenen Werte sind in der Abb. 21 benutzt worden, um für $l/h = 35 \dots 60$ die Gewichte zu bestimmen.

Die Übersicht 22 gibt die in Abb. 21 gefundenen Werte.

Übersicht 22. Theoretische Hauptträgergewichte.
Multiplikator $\gamma/\sigma_0 pl^2$.

$g/p =$		$1/2$						1					
		8		9		10		8		9		10	
$l/h =$	35	1,97	2,07	2,19	2,32	2,45	2,59	1,83	1,90	1,98	2,07	2,16	2,26
	40	2,08	2,17	2,27	2,39	2,51	2,63	1,95	2,02	2,09	2,17	2,26	2,34
	45	2,19	2,28	2,37	2,47	2,57	2,69	2,08	2,14	2,21	2,28	2,36	2,43
	50	2,31	2,39	2,48	2,57	2,66	2,77	2,21	2,27	2,33	2,40	2,47	2,54
	55	2,45	2,52	2,60	2,68	2,77	2,87	2,34	2,40	2,46	2,53	2,59	2,66
	60	2,60	2,65	2,72	2,80	2,89	2,98	2,48	2,53	2,59	2,66	2,72	2,78

$g/p =$		2						3					
		8		9		10		8		9		10	
$l/h =$	35	1,73	1,78	1,83	1,89	1,95	2,01	1,67	1,72	1,76	1,81	1,86	1,91
	40	1,85	1,90	1,95	2,01	2,06	2,12	1,80	1,84	1,89	1,93	1,98	2,03
	45	1,98	2,03	2,08	2,13	2,18	2,24	1,93	1,97	2,02	2,06	2,10	2,15
	50	2,11	2,16	2,21	2,26	2,30	2,36	2,07	2,10	2,15	2,19	2,23	2,28
	55	2,25	2,29	2,34	2,39	2,43	2,49	2,21	2,24	2,28	2,32	2,36	2,41
	60	2,39	2,42	2,47	2,52	2,57	2,62	2,35	2,38	2,42	2,46	2,50	2,54

Ein Vergleich mit den Hauptträgergewichten der Bauart I, Übersicht 11, zeigt, daß die Gewichte des Systems mit 2 Seitenöffnungen rund 20 Hundertstel größer sind. Z. B. $g/p = 2$,

$$l/f = 10, l/h = 50 : \frac{2,21}{1,84} = 1,2.$$

4. Näherungsformeln.

Wie bei der Bauart mit einer Öffnung, so wurden auch hier angenäherte Gleichungen für ν und damit für die Hauptträgergewichte gefunden. Für ν lautet die Gleichung — die Asymptote ist hier $16/17 = 0,9412$ —

$$\nu = 0,9412 - \frac{1}{0,0962 (l/f)^{0,156} (l/h)^{1,21} (g/p)^{0,66}} \quad (86)$$

Setzt man den angenäherten ν -Wert der Gl. (86) in die angenäherten Gleichungen (18), (48), (80) und (81) ein, so erhält man

$$G_{\sigma_0 + u} = 2l/h \left[0,01427 + \frac{0,0641 + 0,0182 \text{ g/p}}{0,0962 (l/f)^{0,156} (l/h)^{1,21} (g/p)^{0,66}} \right] \frac{\gamma}{\sigma_0} pl^2 \quad (87)$$

$$G_{\alpha + \nu} = \left(\frac{2}{\sin 2\alpha} + \cot \alpha \right) \left[0,1082 + \frac{0,1780 + 0,0546 \text{ g/p}}{0,0962 (l/f)^{0,156} (l/h)^{1,21} (g/p)^{0,66}} \right] \frac{\gamma}{\sigma_0} pl^2 \quad (88)$$

$$\text{für } \alpha = 45^\circ \text{ wird: } \left(\frac{2}{\sin 2\alpha} + \cot \alpha \right) = 3.$$

Durch Addition beider Gleichungen wird das gesamte theoretische Hauptträgergewicht

$$G = \left[0,02854l/h + 0,3246 + \frac{2l/h (0,0641 + 0,0182 \text{ g/p}) + 3 (0,1780 + 0,0546 \text{ g/h})}{0,0962 (l/f)^{0,156} (l/h)^{1,21} (g/p)^{0,66}} \right] \frac{\gamma}{\sigma_0} pl^2. \quad (89)$$

5. Einfluß der Änderung der fest angenommenen Werte σ_k , σ_0 und $\alpha \text{ Et}$.

Um die Zahl der Veränderlichen zu vermindern, waren bei der Ermittlung von ν , dem Beiwert der H-Fläche, σ_k die zulässige Kabelspannung zu 5,0 t/qcm, σ_0 die zulässige Beanspruchung des Versteifungsträgers zu 2,5 t/qcm, $\alpha = 0,000012$, $E_0 = E_k = 2150 \text{ t/qcm}$, $t = 38,8^\circ \text{ C}$ ($\alpha \text{ Et} = 1$) angenommen worden. Bei irgendeiner Abweichung dieser Werte wird sich die Größe von ν ändern und damit auch das Gewicht.

Bei der unter VI als Beispiel gegebenen Manhattan-Brücke (Bauart II) ist $g/p = 1,5$, $l/f = 10$ und $l/h = 60$. Die zulässige Kabelspannung stimmt mit der von uns angenommenen überein. Dagegen sind von verschiedenem Werte

$$\sigma_0 = 2,7 \text{ t/qcm}; \quad \alpha E_k t = 0,00001188 \cdot 2150 \cdot 30,6 = 0,78;$$

$$\frac{E_k}{E_0} = \frac{2150}{2040} = 1,05.$$

Man erhält ν am einfachsten aus der Darstellung des Nenners (Abb. 18) der ν -Gleichung (79). Der Nenner lautete

$$N = (0,7 \sigma_0 f/h E_k/E_0 1/\nu - \alpha E_k t) - N_1 [\sigma_k - \alpha E_k t (1 - {}^{17/16} \nu)]$$

$$N_1 = \frac{1/\nu^2 (\nu - 4/9)^3 + 1 - \nu}{(g/p + \nu) (1 - {}^{17/16} \nu)}.$$

Die hyperbelförmige Kurve (Abb. 18) ändert sich nicht, der ver-

schiedene Wert $\alpha E_k t$ hat auf sie nur einen verschwindend kleinen Einfluß, da $\alpha E_k t(1 - \frac{17}{16} \nu)$ gegen σ_k klein ist. Dagegen verschiebt sich die Gerade in die strichpunktierte Lage (Abb. 18). Es ergibt sich, die Nachrechnung durch Gl. (79) bestätigt es, $\nu = 0,9075$. Mit diesem Wert findet man aus den Gl. (86) und (87)

$$\begin{aligned} G_{o+u} &= 2,112 \frac{\gamma}{\sigma_0} pl^2 \\ G_{d+v} &= 0,353 \quad \text{„} \\ \hline G &= 2,465 \frac{\gamma}{\sigma_0} pl^2. \end{aligned}$$

Die Übersicht 22 hätte für die Verhältnisse der Manhattan-Brücke gegeben

$$G = 2,520 \frac{\gamma}{\sigma_0} pl^2,$$

welcher Wert also um rund 2 Hundertstel zu groß wäre. Wenn man berücksichtigt, daß der Ausführungsbeiwert nicht genau feststeht, so dürfte man bei nicht zu großen Abweichungen der bei der Ausmittlung fest angenommenen Größen die in den Übersichten gegebenen Werte als genau genug annehmen.

IV. Theoretische Gewichte von Kabel und Hängeseilen.

1. Kabel. Der Kabelquerschnitt war für die Bauart mit einer Öffnung nach Gl. (24)

$$F_k = \frac{(g/p + \nu) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2}}{\sigma_k - \alpha E t (1 - \nu) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2}} \frac{pl^2}{8f}$$

für die Bauart mit Seitenöffnungen nach Gl. (77)

$$F_k = \frac{(g/p + \nu) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2}}{\sigma_k - \alpha E t (1 - \frac{17}{16} \nu) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2}} \frac{pl^2}{8f}$$

Nimmt man $\nu = 1$, entspr. $\nu = \frac{16}{17}$, an — der Fehler beträgt weniger als ein Hundertstel, da $\alpha E t (1 - \nu) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2}$ klein gegen σ_k ist —, so wird für beide Fälle

$$F_k = \frac{(g/p + \nu) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2}}{8f} \frac{pl^2}{\sigma_k} \quad (90)$$

Die Länge des parabelförmig angenommenen Kabels zwischen den Pylonen (wir betrachten wieder nur die Mittelöffnung) beträgt

$$L = l(1 + 8/3 f^2/l^2),$$

dann wird sein Gewicht

$$G_k = F_k \cdot L \cdot \gamma = 1/8 l/f (g/p + 1) \sqrt{1 + 16 f^2/l^2} (1 + 8/3 f^2/l^2) \frac{\gamma}{\sigma_k} pl^2.$$

Für $\sqrt{1 + 16 f^2/l^2} (1 + 8/3 f^2/l^2)$ kann man, genau für $l/f = 10$, auf 4 Stellen genau für die Nachbarwerte, setzen ($1 + 10,575 f^2/l^2$), so daß wird

$$G_k = \frac{g/p + 1}{8} (l/f + 10,575 f/l) \frac{\gamma}{\sigma_k} pl^2. \quad (91)$$

In der folgenden Übersicht sind für $g/p = 1; 2; 3$ und für $l/f = 8$ bis 13 die Gewichte gegeben.

Übersicht 23. Theoretisches Kabelgewicht (zwischen den Pylonen).
Multiplikator $\gamma/\sigma_k pl^2$

l/f	8	9	10	11	12	13
g/p = 1	2,331	2,544	2,764	2,990	3,220	3,453
2	3,496	3,816	4,146	4,485	4,830	5,180
3	4,661	5,088	5,529	5,981	6,441	6,907

2. Hängeseile. Das Gewicht, welches die Hängeseile zu tragen haben, beträgt, wenn für 1 lfd. m g das Gesamtgewicht, g_k das Kabelgewicht und p die Verkehrslast bedeuten, $(g - g_k + p)l$.

Man darf angenähert setzen $g_k = 0,3g$ und $\nu = 1$, vor allem da das Gewicht der Hängeseile verhältnismäßig gering ist. Denkt man sich ferner die Seile aufgelöst zu einer Scheibe zwischen Kabel und Träger, die Ansichtsfläche derselben ist $1/3 fl$, so wird das Gewicht der Hängeseile

$$G_z = \frac{1}{3} fl (0,7g + p) \frac{\gamma}{\sigma_z} = \frac{1}{3} \frac{f}{l} (0,7g/p + 1) \frac{\gamma}{\sigma_z} pl^2 \quad (92)$$

das in der Übersicht 24 dargestellt wird.

Übersicht 24. Theoretisches Gewicht der Hängeseile.
Multiplikator $\gamma/\sigma_z \cdot pl^2$

l/f	8	9	10	11	12	13
g/p = 1	0,0709	0,0630	0,0567	0,0515	0,0473	0,0436
2	0,1000	0,0889	0,0800	0,0727	0,0666	0,0615
3	0,1291	0,1150	0,1033	0,0940	0,0861	0,0795

V. Günstigste Verhältnisse von Pfeil- und Trägerhöhe.

1. Pfeilhöhe. Beim Entwurfe einer Kabelbrücke mit Versteifungsträger kommen zwei Größen, die Pfeil- und die Trägerhöhe, in Betracht. Um das in bezug auf die Kosten günstigste Pfeilverhältnis zu erhalten, müßte die Summe der Kosten von Kabel, Hängestangen, Pilonen und Verankerung ihren Kleinstwert erreichen. Ohne Berücksichtigung der Verankerung gibt Häseler als günstigstes Pfeilverhältnis $1/6$ an.⁵⁾ Melan leitet eine Formel ab, in der die Stützweite enthalten ist. In dem von ihm gegebenen Beispiel ist eine Stützweite von 100 m gewählt, das günstigste Pfeilverhältnis beträgt dann $1/9$.⁶⁾ Bei der Wahl einer dem Trägersystem zugehörigen Stützweite ergibt sich ein gleiches Ergebnis wie bei Häseler. Die von letzterem für ein System mit Rückhaltketten gegebene Berechnung soll auf ein solches mit Seitenöffnungen angewendet werden. Wir betrachten Kabel und Hängeseilgewicht der halben Mittelöffnung + Gewicht der halben Pilonen, also ein Viertel der ganzen Brücke. Kabel- und Hängeseilgewicht wurde unter IV gegeben. Der halbe Auflagedruck auf die Pilonen beträgt

$$S/2 = Htg \alpha_0.$$

Mit

$$H = \frac{1}{8} (g/p + 1) \frac{pl^2}{f} \text{ und } tg \alpha = \frac{4f}{l} \text{ wird}$$

$$S/2 = \frac{1}{2} (g/p + 1) pl,$$

und das theoretische Gewicht mit der Höhe f

$$1/2 fl (g/p + 1) \frac{\gamma}{\sigma_0} pl^2$$

Bedeutung

k_k, k_z, k_p die Ausführungsbeiwerte von Kabel, Hängeseilen und Portal

$\varkappa_k, \varkappa_z, \varkappa_p$ die Kosten in M/t von Kabel, Hängeseilen und Portal,

so betragen die Kosten für ein Viertel der Brückenlänge unter Einsetzung der unter IV für Kabel und Hängeseile gefundenen Werte

⁵⁾ Häseler, Die eisernen Brücken 1908 S. 830.

⁶⁾ Handb. d. Ing.-W. 1906 5. Abt. S. 12.

$$K_{1/4} = (g/p + 1) \gamma p l^2 \left\{ \varkappa_k \cdot k_k \cdot 1/16 (l/f + 10,575 f/l) + \varkappa_z k_z \frac{1}{6} \frac{f}{l} \frac{1}{\sigma_z} + \varkappa_p \cdot k_p \cdot \frac{1}{2} \frac{f}{l} \frac{1}{\sigma_0} \right\} \quad (93)$$

Nimmt man an

$$\varkappa_k = 2 \varkappa_z = 2 \varkappa_p, \quad k_k = 1/4 k_z = 1/2,5 k_p \quad \text{und} \\ \sigma_k = 2 \sigma_z = 2 \sigma_0,$$

differenziert Gl. (93) nach (f/l) , so wird

$$\frac{dK}{d(f/l)} = 0 = -\frac{1}{16(f/l)^2} + \frac{10,575}{16} + \frac{1}{2} \cdot 2,5 \cdot \frac{1}{6} \cdot 2 + \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2$$

oder $f/l = 1/7$.

Der kleinere Wert als bei dem System mit 1 Öffnung kommt daher, daß hier die Kabellänge größer ist.

Die Ergebnisse dieser Ermittlungen sind jedoch nicht anwendbar, da derartig große Pfeilhöhen die Standsicherheit verringern und außerdem in ihrer Linienführung das Auge wenig befriedigen. Als obere Grenze kann man den Wert $1/8$ bezeichnen; von den neueren großen Kabelbrücken weisen die Williamsburg-Brücke $1/9$, die Manhattan-Brücke $1/10$ Pfeilverhältnis auf. Der letztere Wert dürfte in praktischer als auch in ästhetischer Hinsicht entsprechen.

2. Trägerhöhe. Die Höhe des Versteifungsträgers beeinflusst nicht nur sein eigenes Gewicht, sondern verändert auch das Gewicht der Quer- und Windverbände. Von der Wirkung verschiedener Felderteilung wird abgesehen, da für diese Untersuchung eine bestimmte Fahrbahn angenommen werden müßte, eine eingleisige Eisenbahnbrücke oder eine Straßenbrücke von 8 oder 10 m Breite. Das behandelte System jedoch, das nur bei großen Verhältnissen am Platze ist, dient dann auch zur Überführung verschiedener Verkehrswege.

Unter der günstigsten Trägerhöhe soll eine solche verstanden werden, welche das Gewicht des Versteifungsträgers (Hauptträger + Verbände) zu einem Kleinstwert macht. Diese Höhe kann dagegen insofern ungünstig sein, als dann, wenn diese zu groß, der Träger einen großen Teil der Verkehrslast selbst trägt, während er nur zur gleichmäßigen Verteilung und Übertragung an das Kabel dienen soll. Bei zu geringer Höhe würde die Beweglichkeit in lotrechter Richtung zu groß werden.

Für das Gewicht der Querbände gibt Winkler⁷⁾ den Wert $0,0026 bh$ (t, m), worin b die Breite und h die Höhe der Brücke

⁷⁾ Winkler, Die Querkonstruktionen der eisernen Brücken S. 451.

bedeuten. Zu diesem Wert sollen 50 Hundertstel zugeschlagen werden als der Teil des Windverbandes, der von der Trägerhöhe abhängig ist.

Da es sich bei dieser Untersuchung um die wirklichen Gewichte handelt, müssen die theoretischen Gewichte, für welche die Näherungsgleichungen genommen werden, mit einen Ausführungsbeiwert multipliziert werden, der für die Gurte konstant und zu 1,2, für die Wand jedoch als Funktion der Höhe angenommen wird. Bei wachsender Höhe werden Querschnittvergrößerungen wegen der Knicksicherheit und Hilfsstäbe bei der Wand notwendig. Dieser Beiwert wurde zu $(h/7,5 + 1)$ gewählt; es ergibt sich also bei 7,5 m Höhe der Wert 2.

Für das System mit 1 Öffnung ergibt sich dann das Gewicht von Hauptträger + Verbände zu

$$G = 1,2 G_{0+n} + (h/7,5 + 1) G_{d+v} + 0,0039 \text{ bhl}$$

und mit den Gl. (67) und (68)

$$G = \left\{ 1,2 \cdot 21/h \left[0,01195 + \frac{0,0590 + 0,0185 \text{ g/p}}{0,1013 (l/f)^{0,189} (l/h)^{1,24} (g/p)^{0,63}} \right] \right. \\ \left. + \left(\frac{h}{7,5} + 1 \right) 3 \left[0,1014 + \frac{0,1703 + 0,0555 \text{ g/p}}{0,1013 (l/f)^{0,189} (l/h)^{1,24} (g/p)^{0,63}} \right] \right\} \frac{\gamma}{\sigma_0} p l^2 \\ + 0,0039 \text{ bhl.}$$

Setzt man $p = p_0 b$ und differenziert nach l/h , so erhält man

$$\frac{dG}{d(l/h)} = 0 = 0,02868 - \frac{1}{24,6 (l/h)^2} \\ - \frac{0,576(0,0590 + 0,0185 \text{ g/p}) + \frac{3,72(0,1703 + 0,0555 \text{ g/p})}{l/h} + \frac{0,896(0,1703 + 0,0555 \text{ g/p})}{(l/h)^2}}{0,1013 (l/f)^{0,189} \cdot (l/h)^{1,24} \cdot (g/p)^{0,63}} \\ - \frac{0,0039 \cdot \sigma_0}{\gamma \cdot p_0 (l/h)^2} \quad (94)$$

Für z. B. $g/p = 1,5$; $l/f = 10$; $\sigma_0 = 25000 \text{ t/qm}$; $\gamma = 7,9 \text{ t/cbm}$; $p_0 = 0,5 \text{ t/qm}$ wird

$$0 = 0,02868 - \frac{1}{24,6 (l/h)^2} - \frac{1}{0,202 (l/h)^{1,24}} \left(0,0500 + \frac{0,943}{l/h} \right. \\ \left. + \frac{0,227}{(l/h)^2} \right) - \frac{24,7}{(l/h)^2} \quad (95)$$

Für $l = 300 \text{ m}$ wird

$$l/h = 40,$$

für $l = 600 \text{ m}$

$$l/h = 46.$$

Für das System mit Seitenöffnungen erhält man ähnliche Gleichungen

$$\frac{dG}{d(l/h)} = 0 = 0,03425 - \frac{1}{23,1(l/h)^2} - \frac{0,504(0,0641 + 0,0182g/p) + \frac{3,63(0,1780 + 0,0546g/p)}{l/h} + \frac{0,884(0,1780 + 0,0546g/p)}{(l/h)^2}}{0,0962 \cdot (l/f)^{0,156} (l/h)^{1,21} \cdot (g/p)^{0,66}} - \frac{0,0039 \sigma_0}{\gamma \cdot p_0 \cdot (l/h)^2} \quad (96)$$

und mit denselben Werten wie vorher

$$0 = 0,03425 - \frac{1}{23,1(l/h)^2} - \frac{0,0461 + 0,943/l/h + 0,230/(l/h)^2}{0,180(l/h)^{1,21}} - \frac{24,7}{(l/h)^2} \quad (97)$$

Für $l = 300$ m wird

$$l/h = 38,$$

für $l = 600$ m

$$l/h = 44.$$

Die Ergebnisse für beide Bauarten weichen nur wenig voneinander ab, für die zweite ergibt sich eine größere Höhe als günstig, da das Trägergewicht größer ist. Der Mittelwert ist $1/42$. Dieses Verhältnis wurde bei der Williamsburg-Brücke angewendet, während bei der Manhattan-Brücke $1/60$ gewählt worden ist. Man dürfte als obere Grenze $1/40$ und als untere $1/60$ bezeichnen. Bohny⁴⁾ bestimmt durch einen etwas willkürlichen Vergleich mit einem Balkenträger die Höhe zu $1/45$. Schließlich haben diese Betrachtungen nur theoretisches Interesse, da für die Ausführung andere Gesichtspunkte, wie die bereits erwähnte Steifigkeit, oder die Lage zweier Fahrbahnen übereinander, wie bei der Manhattan-Brücke, in Frage kommen.

VI. Die wirklichen Gewichte.

Die wirklichen Gewichte, die bereits im vorigen Abschnitt benutzt wurden, erhält man durch Multiplikation der theoretischen Gewichte mit einem Ausführungsbeiwert k , der die Gewichtsvermehrung durch Laschen, Knotenbleche, Vergitterung u. dgl. angibt und der sich für die Hauptträger zwischen 1,2 und 1,5 bewegt. Der Kabelbeiwert kann gleich 1,02 angenommen werden, der Beiwert der Hängeseile, wenn man die Schellen und sonstige Befestigungsteile dazu rechnet, zwischen 2,5 und 3,5.

Um die theoretischen Gewichte aus den Tabellen entnehmen zu können, muß man den Wert g/p haben. g setzt sich zusammen aus dem Gewicht von Kabel, Hängeseilen, Hauptträger, Fahrbahn und Verbänden. Das Fahrbahngewicht kann genau, das Gewicht der Verbände annähernd berechnet werden. Bedeuten

$\zeta_k, \zeta_z, \zeta_h$ die Beiwerte der theoretischen Gewichte von Kabel, Hängeseile, Hauptträger,

k_k, k_z, k_h die Ausführungsbeiwerte von Kabel, Hängeseile, Hauptträger,

$\sigma_k, \sigma_z, \sigma_0$ die zulässigen Spannungen von Kabel, Hängeseile, Hauptträger,

g_f Fahrbahn + Verbandgewicht für 1 Hauptträger und 1 lfd. m, so erhält man für das Gesamtgewicht (auf 1 Hauptträger)

$$g = k_k \cdot \zeta_k \cdot \gamma / \sigma_k pl + k_z \cdot \zeta_z \cdot \gamma / \sigma_z pl + k_h \cdot \zeta_h \cdot \gamma / \sigma_0 pl + g_f \quad (98)$$

oder mit

$$\sigma_k = 2 \sigma_z = 2 \sigma_0; k_k = 1,02; k_z = 3,0; k_h = 1,35$$

$$\gamma = 7,9 \text{ t/cbm (durchschnittlich für Draht und Nickelstahl)}$$

$$\sigma_0 = 25000 \text{ t/qm}$$

$$g/p = [0,51 \zeta_k + 3,0 \zeta_z + 1,35 \zeta_h] \frac{1}{3165} + \frac{g_f}{p} \quad (99)$$

Nach Berechnung von g_f , Entnahme der ζ -Werte für die gewählten Größen l/f und l/h und für den geschätzten Wert g/p , wird man nach höchsten zweimaligen Durchrechnens der Gl. (99) die richtige Größe von g/p finden und darauf die ζ -Werte nochmals den Übersichten entnehmen.

Als Beispiel soll die bereits erwähnte Manhattan-Brücke in NewYork gewählt werden.⁸⁾ Das Bauwerk ist eine durch 4 Träger, die an 4 Seilen hängen, versteifte Paralleldrahtkabelbrücke. Die Stützweite des Trägers der Mittelöffnung beträgt 441 m (1446,68'), der Seitenöffnung 218 m (713,5'). Der Pfeil der Mittelöffnung, auf die Stützweite bezogen, ist 44,5 m (145,4'), die Trägerhöhe 7,3 m (24'), also $l/f \approx 10$ und $l/h \approx 60$. Der Rechnung zugrunde gelegt wurde $g = 9,3 \text{ t/m}$ ($1/4$ 25000 lbs/f) und $p = 5,95 \text{ t/m}$ ($1/4$ 16000 lbs/f), das gibt $g/p \approx 1,5$. Die ausgeführten Gewichte betragen:

⁸⁾ Die Werte verdanke ich Herrn L. Moisseiff, Engineer in Charge, Department of Bridges, City of NewYork.

1 Kabel	1,54 t/m (1032 lbs/f)
Hängeseile	0,29 " (198 ")
1 Hauptträger	2,56 " (1717 ")
1/4 (Fahrbahn-Verbände)	4,21 " (2832 ")
	8,60 t/m (5779 lbs/f)

Die zulässigen Beanspruchungen sind

$$\sigma_k = 48\,000 \text{ t/qm (68\,300 lbs/sq. i nicht zulässige, sondern wirkliche Spannung)}$$

$$\begin{array}{l} \sigma_z = 21\,000 \text{ " (30\,000 ")} \\ \sigma_o = 27\,000 \text{ " (40\,000 " für Zug)} \\ \text{Mittel} \quad \quad \quad \text{(37\,000 " " Druck).} \end{array}$$

Für die Hauptträger war wegen der Abweichungen der in der Rechnung fest angenommenen Werte unter III, 5 $\zeta = 2,465$ (statt 2,52) gefunden worden. Für das Kabelgewicht gibt Übersicht 24 den Wert $\zeta_k = 3,455$, für die Hängeseile Übersicht 25 $\zeta_z = 0,0684$. Dann wird

$$g_k = k_k \cdot \zeta_k \cdot \frac{\gamma}{\sigma_k} pl = 1,02 \cdot 3,455 \frac{7,9}{48\,000} \cdot 5,95 \cdot 448 = 1,54 \text{ t/m}$$

$$g_z = k_z \cdot \zeta_z \cdot \frac{\gamma}{\sigma_z} pl = 3 \cdot 0,0684 \frac{7,9}{48\,000} \cdot 5,95 \cdot 441 = 0,29 \text{ t/m}$$

$$g_h = k_h \cdot \zeta_k \cdot \frac{\gamma}{\sigma_o} pl = 1,35 \cdot 2,465 \frac{7,9}{27\,000} \cdot 5,95 \cdot 441 = 2,56 \text{ t/m.}$$

Die Werte stimmen mit den Gewichten überein. Trotzdem die Träger der Manhattan-Brücke nach der Theorie von Melan berechnet worden sind, nicht nach der der Ableitung zugrunde gelegten Methode, lassen sich die Ergebnisse der Ableitung auch hier verwenden.

VII. Schlußbemerkung.

Die Näherungsgleichungen für die theoretischen Hauptträgergewichte (als Ausführungsbeiwert kann man 1,35 annehmen) sollen als Ergebnis der Arbeit wiederholt werden.

Für die Bauart mit 1 Öffnung ist Gl. (64)

$$G = \left[0,02390 l/h + 0,3042 + \frac{2l/h(0,0590 + 0,0185 g/p) + 3(0,1703 + 0,0555 g/p)}{0,1013 (l/f)^{0,189} (l/h)^{1,24} (g/p)^{0,63}} \right] \frac{\gamma}{\sigma_o} pl^3,$$

für die Bauart mit Seitenöffnungen Gl. (89)

$$G = \left[0,02854 l/h + 0,3246 + \frac{2l/h(0,0641 + 0,0182 g/p) + 3(0,1780 + 0,0546 g/p)}{0,0962 (l/f)^{0,156} (l/h)^{1,21} (g/p)^{0,63}} \right] \frac{\gamma}{\sigma_0} pl^2.$$

Schließlich sei noch auf die Formeln für den Beiwert der H-Fläche hingewiesen, die für den ersten Rechnungsgang beim Entwerfen benutzt werden können. Für die Bauart I ist nach Gl. (61)

$$\nu = 1 - \frac{1}{0,1013 (l/f)^{0,180} (l/h)^{1,24} (g/p)^{0,63}},$$

für die Bauart II Gl. (86)

$$\nu = 0,9412 - \frac{1}{0,0962 \cdot (l/f)^{0,156} (l/h)^{1,21} (g/p)^{0,63}}.$$





S. 61

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



L. inw.

32253

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

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299724