Bruchmoment $M_b = 9900$ kgcm.

Sicherheit $n = \frac{9900}{2720} = 3{,}6.$

Vorderholm-Ausleger.

Biegungsmoment $M_0 = 2400 \cdot \frac{180}{158} = 2740$ kgcm.

Bruchmoment $M_b = 13400$ kgcm.

Sicherheit $n = \frac{13400}{2740} = 4{,}9.$

Hinterholm, Mittelteil.

$S = -2 \cdot 488 = 976$ kg.

Biegungsmoment $M_0 = 2 \cdot 775 \cdot \frac{180}{158} = 1770$ kgcm.

Knicklast $P_k = 1270$ kg.

Knicksicherheit $n = \frac{1270}{976} = 1{,}3.$

Größtmoment $M = 1770 \cdot \frac{1{,}3}{0{,}3} = 7700$ kgcm.

Bruchmoment $M_b = 14300$ kgcm.

Sicherheit $n = \frac{14300}{7700} = 1{,}86.$

Der einfachen Abtriebsbelastung gegenüber:

$$n = 2 \cdot 1{,}86 = 3{,}72.$$

Hinterholm-Ausleger.

Biegungsmoment $M_0 = 3070 \cdot \frac{180}{158} = 3500$ kgcm.

Bruchmoment $M_b = 16240$ kgcm.

Sicherheit $n = \frac{16240}{3500} = 4{,}65.$

Die Holme haben demnach durchgängig ausreichende Querschnittsabmessung.

Stiele und Tragkabel.

Die der Auftriebs- und Abtriebsbelastung entsprechenden Spannkräfte sind im Abschnitt „Spannkräfte im Zellensystem“ zusammengestellt. Es ergeben sich sowohl für die Stiele als auch für die jeweilig gespannten Kabel die größten Spannkräfte infolge Abtriebsbelastung. Die diesem Belastungsfall entsprechenden Spannkräfte, die Querschnitte und Sicherheiten sind aus folgenden Tabellen ersichtlich.

Stiele.

Stab	Querschnitt	J_{min}	Spannkraft	Bruchlast	Sicherheit
Stiel vorn	⌀ 30/1,0	0,96	— 86 kg	775 kg	9,0
Stiel hinten	⌀ 30/1,0	0,96	— 109 „	775 „	7,1

Kabel.

Kabel	Querschnitt	Spannkraft	Bruchlast	Sicherheit
k vorn	⌀ $5\frac{1}{2}$	+ 262 kg	2400 kg	9,2
k hinten	⌀ $5\frac{1}{2}$	+ 333 „	2400 „	7,2
l vorn	⌀ $5\frac{1}{2}$	+ 334 „	2400 „	7,2
l hinten	⌀ $5\frac{1}{2}$	+ 426 „	2400 „	5,6

Bei den Kabeln *l*, die nur bei Abtrieb gespannt werden, erscheint die Sicherheit ziemlich groß. Man darf hier jedoch nicht die Montagespannungen vergessen, deren Größe sehr wechselt.

Innenverspannung.

Die in den Streben und Seilen der Innenverspannung auftretenden Spannkräfte sind schon im Abschnitte „Aufnahme

der Horizontalkräfte“ ermittelt, sie sind mit den Querschnitten und Sicherheiten in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Obere Fläche.

Stab	Spannkraft	Gewähltes Profil	J_{min}	Knicklast	Bruchlast	Sicherheit
s_1	—	Ø 25/0,5	0,28	965 kg	—	—
s_2	— 38,1 kg	Ø 25/0,5	0,28	965 „	—	25,4
s_3	— 38,1 „	Ø 25/0,5	0,28	965 „	—	25,4
d_1	—	Ø 2,5	—	—	500 kg	—
d_2	+ 84,0 „	Ø 2,5	—	—	500 „	5,9
d_3	+ 84,0 „	Ø 2,5	—	—	500 „	5,9

Untere Fläche.

Stab	Spannkraft	Gewähltes Profil	J_{min}	Knicklast	Bruchlast	Sicherheit
s_1	—	Ø 15/0,5	—	—	—	—
s_2	— 36 kg	Ø 20/0,5	0,15	520 kg	—	14,4
s_3	— 36 „	Ø 20/0,5	0,15	520 „	—	14,4
d_1	—	Ø 2,5	—	—	—	—
d_2	+ 68,5 „	Ø 2,5	—	—	500 kg	7,3
d_3	+ 68,5 „	Ø 3,0	—	—	650 „	9,5

Spannturm.

Der Spannturm wird durch horizontale und vertikale Kräfte beansprucht.

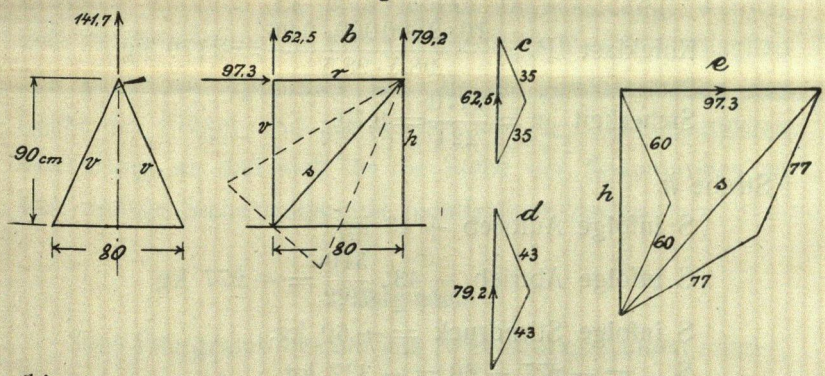
Beim normalen Flug ziehen die Flügel mit 141,7 kg den Spannturm aufwärts. Davon kommen 62,5 kg auf die vordere Ecke und 79,2 kg auf die hintere Ecke. Der horizontale Stirndruck beträgt $\frac{1}{5}$ der aufwärts wirkenden Knotenlast, also

$\frac{1}{5} \cdot 141{,}7 = 28{,}3$ kg; außerdem sind die in die Tiefenrichtung des Spannturmes fallenden Komponenten der vom vorderen Spannturmeck ausgehenden Innenseile aufzunehmen, oder die am Endpunkt des Außenstiels auftretenden Stirndrücke, d. h. eben die gesamten auf die oberen Flügel drückenden Horizontalkräfte.

$$\Sigma\, H = 28{,}3 + 2 \cdot 34{,}5 = 97{,}3 \text{ kg.}$$

Die vorderen senkrechten 62,5 kg werden restlos von den vorderen Streben *v* aufgenommen, siehe Fig. 40c. Die

Fig. 40a—e.



hinteren senkrechten 79,2 kg restlos von den hinteren Streben, siehe 40d. Der Querriegel *r* wird mit 97,3 kg gedrückt, und es erhalten infolge der Horizontalbelastung die Stäbe *s* und *h* Zusatzspannkräfte, *s* Zug und *h* Druck. Nun wird im Seitenriß durch Umklappung der Strebenebene *s* in die Zeichenebene für den Plan 40e die Kraftrichtung festgelegt. Die *h*-Ebene ist im Aufriß mit der *v*-Ebene identisch.

Bei Abtriebsbelastung wird der Spannturm erheblich stärker beansprucht. Die gespannten Kabel *l* (Fig. 28) wirken mit ihren senkrechten Komponenten nach unten. Insgesamt sind aufzunehmen: $2 \cdot 195 + 2 \cdot 180 + 160 = 910$ kg. Davon kommen auf die vordere Ecke $910 \cdot 0{,}44 = 400$ kg und auf

die hintere Ecke 510 kg. Die Horizontalbelastung bleibt wie vorher. Die Spannkräfte infolge senkrechter Abtriebsbelastung ergeben sich aus denen infolge Auftriebsbelastung durch Multiplikation mit $-\frac{400}{62,5}$ vorn und mit $-\frac{510}{79,2}$ hinten.

Strebe *v*.

S infolge Auftrieb $+35$ kg.

S infolge Abtrieb $-35 \cdot \frac{400}{62,5} = -224$ kg.

Gewählt Rohr ⌀ 30/1,0.

Trägheitsmoment $J = 0,96$ cm^4.

Knicklast $P_k = \frac{10 \cdot 2200000 \cdot 0,96}{98,5 \cdot 98,5} = 2170$ kg.

Sicherheit $n = \frac{2170}{224} = 9,70$.

Strebe *h*.

S infolge Auftrieb $+43$ kg.

S infolge Abtrieb $-43 . \frac{510}{79,2} = -277$ kg.

S infolge Stirndruck $= -60$ kg.

$S_{max} = -277 - 60 = -337$ kg.

Die Knicklast bei einem Rohr ⌀ 30/1,0, einem Trägheitsmoment $J = 0,96$ cm^4 und einer Länge von 98,5 cm beträgt

$P_k = 2170$ kg.

Sicherheit $n = \frac{2170}{337} = 6,4$.

Querriegel *r*.

Das Rohr hat einen Druck von 97,3 kg aufzunehmen und zwar auf eine Länge von 80 cm, bei einem Querschnitt ⌀ 30/1,0.

Knicklast $P_k = \frac{10 \cdot 2200000 \cdot 0,96}{80 \cdot 80} = 3300$ kg.

Sicherheit $n = \frac{3300}{97,3} = 34$.

Seitenstrebe *s*.

Diese Strebe erhält nur durch Stirndruck Spannung und zwar 77 kg Zug. Gewählt ist ein Rohr ⌀ 25/1,0. Einem Querschnitt von 75,5 qmm entspricht eine Bruchlast

$$P_b = 75{,}5 \cdot 55 = 4150 \text{ kg.}$$

Sicherheit gegen Zerreißen $n = \frac{4150}{77} = 54.$

Die einzelnen Stäbe des vorliegenden Spannturmes sind nach den eben errechneten Sicherheitsgraden sehr reichlich dimensioniert und könnten demnach durchgängig schwächer gehalten werden. Es muß jedoch berücksichtigt werden, daß der Spannturm ein überaus wichtiges Konstruktionsglied des gesamten Apparates ist. Er ist gewissermaßen das Lager der Flügel und als solches von der fundamentalsten Bedeutung, so daß sich für die Stäbe des Spannturmes an sich höhere Sicherheitsgrade rechtfertigen lassen.

Fahrgestell.

Das Fahrgestell besteht aus zwei Strebenwänden *l* und *r*, der Achse *a* und der Seilverspannung zwischen den Strebenwänden. Die Räder, Hilfsachse, Gummihalter usw. interessieren hier nicht, da wir uns nur mit dem Fahrgestellfachwerk beschäftigen.

Jede schräge Strebenwand besteht aus einer steileren vorderen und einer schwächer geneigten hinteren Strebe.

Das Fahrgestellfachwerk ist ein räumliches Gebilde.

Jeder neu geschaffene feste Punkt muß durch drei nicht in einer Ebene liegende Stäbe an vorhandene feste Punkte angeschlossen werden. Punkt *i* ist durch steife Stäbe an die festen Rumpfpunkte *d* und *b* angeschlossen und so in der Ebene $l = i—d—b$ festgelegt. Der dritte nicht in dieser

Ebene liegende, zum festen Rumpf führende steife Stab wird ersetzt durch die Diagonalverspannung. Der Punkt *k* ist wieder durch das zugehörige Strebenpaar in der Ebene *r* festgelegt. Die Achse *a* bildet den dritten Stab, mit dem Punkt *k* an den festen Punkt *i* angeschlossen ist.

Umgekehrt kann man bei der Betrachtung auch vom Punkt *k* ausgehen und dann zum Punkt *i* übergehen.

Gemeinhin gesprochen sind die beiden Punkte *i* und *k* in den zugehörigen Strebenebenen festgelegt, sodann durch

Fig. 41 a.

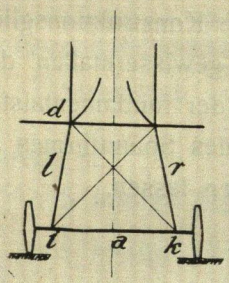
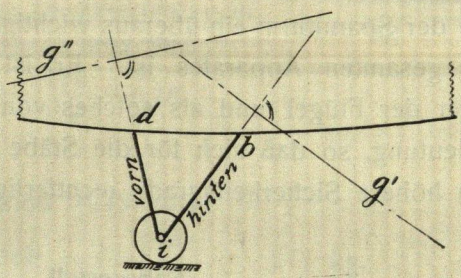


Fig. 41 b.



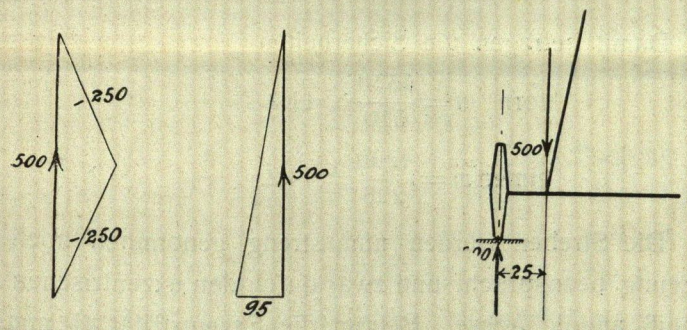
die Achse *a* gegeneinander abgestützt und gegen eine seitliche Verschiebung durch Diagonalverspannung gesichert.

Das Fahrgestell hat den Landungsstoß aufzunehmen, der je nach der Heftigkeit der Landung, die wiederum von der mehr oder weniger bewegten Luft wie von der Geschicklichkeit des Piloten abhängt, als ein Vielfaches des Apparatgewichtes anzunehmen ist. Man pflegt auch hier mit einer mindestens fünffachen Sicherheit zu rechnen, was im vorliegenden Falle einer Aufnahmefähigkeit von $5 \cdot 1000 = 5000$ kg entspricht.

Wichtig ist die Annahme der Stoßrichtung. Die letztere kann im äußersten Falle mit der Strebenrichtung *d*—*i* bzw. *b*—*i*

zusammenfallen oder sie kann zwischen beide fallen. In Fig. 41b zeigen die Geraden g' und g'' die Lagen der Horizontalen zum Rumpf an, wenn die Stoßrichtung mit der hinteren bzw. vorderen Strebe zusammenfällt. Ein Zusammenfallen mit der hinteren Strebenrichtung gilt demnach als ausgeschlossen, da der vordere Rumpfteil bei so schiefer Landung vorher eingedrückt werden würde. Möglich ist ein Zusammenfallen mit der vorderen Strebenrichtung, wodurch auch die ungünstigste Belastung der Fahrgestellstreben erreicht wird.

Fig. 42a. Fig. 42b. Fig. 42c.



Da auf jede Strebenwand 500 kg beim einfachen Belastungsfall kommen, so erhält jede vordere Strebe $500 \cdot \frac{100}{98} = 510$ kg Druck, wenn durch den Bruch $\frac{100}{98}$ das Neigungsverhältnis der Strebenwände in der Stirnansicht gekennzeichnet wird.

Fällt die Stoßrichtung zwischen beide Streben, so würden nach Fig. 42a von der vorderen Strebe $250 \cdot \frac{100}{98} = 255$ kg und von der hinteren $290 \cdot \frac{100}{98} = 296$ kg Druck aufzunehmen sein, worin $\frac{100}{98}$ wieder die Strebenneigung in der Stirnansicht charakterisiert.

Für die vordere Strebe werden nun 510 kg Druck und für die hintere 296 kg Druck als maßgebende Einheitsbelastung angenommen. Für beide Streben wird dasselbe Rundrohr im scharfen Bogen um die Achse geführt und zwar vom Profil Ø 40/1,2. Bei einer Systemlänge von 1,0 m bzw. 1,20 m ergeben sich für die Streben vorn bzw. hinten folgende Knicklasten:

$$P_k^v = \frac{10 \cdot 2200000 \cdot 2{,}75}{100 \cdot 100} = 6550 \text{ kg.}$$

$$P_k^h = \frac{10 \cdot 2200000 \cdot 2{,}75}{120 \cdot 120} = 4200 \text{ kg.}$$

Damit betragen die Sicherheiten

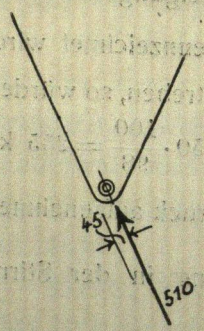
$$\text{vorn} \quad n = \frac{6550}{510} = 11{,}9.$$

$$\text{hinten} \quad n = \frac{4200}{296} = 14{,}2.$$

Die Streben werden nun streng genommen noch auf Biegung beansprucht und zwar durch den exzentrischen Anschluß an die Achse. Beträgt die Exzentrizität 45 mm, so ist nach Fig. 43 noch ein Biegungsmoment zu berücksichtigen von

$$M = 510 \cdot 4{,}5 = 2300 \text{ kgcm.}$$

Fig. 43.



Das definitive Moment des gedrückten Biegungsstabes beträgt

$$M = M_e \cdot \frac{n}{n-1}.$$

Eingesetzt werden die der fünffachen Belastung entsprechenden Werte

$$M_e = 2300 \cdot 5 = 11500 \text{ kgcm.}$$

$$S = 5 \cdot 510 = 2550 \text{ kg.}$$

Knicksicherheit $n = \frac{6550}{2550} = 2{,}56.$

Gesamtmoment $M = 11500 \cdot \frac{2{,}56}{1{,}56} = 18900$ kgcm.

Das Bruchmoment des Rohres bei einer Festigkeit von $60 \frac{kg}{qmm}$ und einem Widerstandsmoment von $W = 1{,}4$ cm³

$$M_b = 6000 \cdot 1{,}4 = 8400 \text{ kgcm.}$$

Das letztere ist wesentlich kleiner als das Gesamtmoment, so daß überhaupt keine Sicherheit gegen Bruch resultieren würde.

Es hängt nun selbstverständlich ganz von der Ausführung ab, ob diese zusätzliche Biegung berücksichtigt werden soll oder nicht. Im bejahenden Falle ist das Strebenrohr entsprechend stärker zu wählen.

Die Achse des Fahrgestelles ist ein auf Biegung und Zug beanspruchter Träger auf zwei Stützen. Der Träger wird durch zwei Einzellasten von je 500 kg belastet und zwar an der Angriffsstelle der Streben. Außer der Biegung wird er durch die Horizontalkomponente der schrägen Strebenkraft auf Zug beansprucht.

Die Horizontalkomponente beträgt 95 kg und das Biegungsmoment

$$M = 500 \cdot 25 = 12500 \text{ kgcm.}$$

Gewählt wird ein Rundrohr vom Querschnitt 55/5 mm.

Das Rohr hat ein Widerstandsmoment

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(5{,}5^4 - 4{,}5^4)}{5{,}5} = 8{,}9 \text{ cm}^3$$

und einen Querschnitt $f = 7{,}87$ cm².

Die Beanspruchung ergibt sich nach Formel

$$\sigma = \frac{P}{f} + \frac{M}{W} = \frac{95}{7{,}87} + \frac{12500}{8{,}9} = 12{,}1 + 1410 = 1422 \frac{kg}{cm^2}.$$

Bei einer Festigkeit des Achsmaterials von 7000 bis 8000 kg pro cm² ist demnach eine Sicherheit vorhanden von

$$n = \frac{8000}{1422} = 5{,}6$$

gegenüber dem einfachen Belastungsfall.

Zum Schlusse sei noch eine Kontrollrechnung für einen Holmteil durchgeführt und zwar für den Hinterholm der oberen Tragfläche im mittleren gestützten Teil. Diese Rechnung wird durchgeführt, um die Verwendungsmöglichkeit der unter Abschnitt II — Statische Grundlagen — gegebenen Formel

$$n = \frac{{}^{n}P \cdot {}^{n}M}{{}^{n}P + {}^{n}M}$$ zu zeigen.

Die Knicklast für den betreffenden Holmteil betrug:

$$P_k = 2380 \text{ kg.}$$

Damit die Knicksicherheit

$${}^{n}P = \frac{2380}{412} = 5{,}8.$$

Das Bruchmoment

$$M_b = 33200 \text{ kgcm.}$$

Das einfache Moment

$$M_0 = 850 \text{ kgcm.}$$

Damit die Sicherheit bei alleiniger Berücksichtigung der Biegung

$${}^{n}M = \frac{33200}{850} = 39.$$

Es ergibt sich also eine Gesamtsicherheit von

$$n = \frac{5{,}8 \cdot 39}{5{,}8 + 39} = 5{,}05 \sim 5{,}1.$$

Das Resultat stimmt mit dem oben ermittelten genau überein.

Es wird jedoch hier ausdrücklich hervorgehoben, daß diese „Sicherheitsformel“ nicht einwandfrei ist und daß man

sich, wie schon bei der Ableitung betont wurde, darauf beschränken muß, sie als „Faustformel“ zu behandeln, wenn es vor allem darauf ankommt, schnelle Überschlagsrechnungen zu liefern. In diesen Fällen ist ihre Verwendungsmöglichkeit allerdings eine sehr dankbare.

3. Statische Berechnung eines Landdoppeldeckers von 16,0 m Flügelausladung.

Der in Fig. 48a in der Stirnansicht dargestellte Doppeldecker ist eine sogenannte zweistielige Maschine. Dieselbe sei mit einem Motor von 220 P. S. ausgerüstet und als „Zweisitzer“ ausgebildet. Das Leergewicht betrage 1200 kg. An Zuladung einschl. Führer und Begleiter sind 600 kg aufzunehmen, so daß sich ein Gesamtgewicht von 1800 kg ergibt.

Die wichtigsten Abmessungen des Apparates sind:

Obere Spannweite	16,00 m
Untere „	16,00 „
Obere Flächentiefe	1,80 „
Untere „	1,60 „
Obere Holmentfernung	900 mm
Untere „	800 „
Flächenabstand	1,80 m
Rumpfbreite beim Fahrgestell	1,0 „

Die oberen Feldweiten des Zellensystems von innen nach außen gerechnet:

3,0 m — 3,50 m — 1,50 m.

Die unteren Feldweiten des Zellensystems von innen nach außen:

2,50 m — 3,50 m — 1,50 m.

Feld- und Knotenlasten des Zellensystems.

Die obere Fläche betrage $F_o = 16{,}0 \cdot 1{,}80 = 28{,}80$ qm.
„ untere „ „ $F_u = 2 \cdot 7{,}50 \cdot 1{,}60 = 24{,}00$ „

Da in bezug auf die Aufnahmefähigkeit der Luftkräfte durch die Flügel bei den unteren ein Tragverlust von 10 % gegenüber dem Tragvermögen der oberen auftritt, so sind zu berücksichtigen

von der oberen Fläche 28,80 qm,
„ „ unteren „ $0{,}90 \cdot 24{,}0 = 21{,}60$ „
$\Sigma F = 50{,}40$ qm.

Bezeichnet A die Summe aller von der Zelle aufzunehmenden Luftkräfte, dem Auftriebe als dem hauptsächlichsten Belastungsfalle entsprechend, so sind von der oberen Fläche aufzunehmen

$$A_o = \frac{28{,}80}{50{,}40} \cdot A = 0{,}57\,A$$

und von der unteren

$$A_u = \frac{21{,}60}{50{,}40} \cdot A = 0{,}43\,A.$$

Bringt man das mit 250 kg anzusetzende Flügelgewicht von dem 1800 kg betragenden Gesamtgewicht in Abzug, so ergibt sich eine von der Zelle aufzunehmende Auftriebsbelastung von $1800 - 250 = 1550$ kg. Von diesen entfallen auf die obere Fläche

$$0{,}57 \cdot 1550 = 885 \text{ kg}$$

und auf die untere Fläche

$$0{,}43 \cdot 1550 = 665 \text{ kg}.$$

Pro lfd. m Flügellänge sind oben aufzunehmen

$\frac{885}{16{,}0} = 55{,}3$ kg und unten $\frac{665}{2 \cdot 7{,}50} = 44{,}3$ kg.

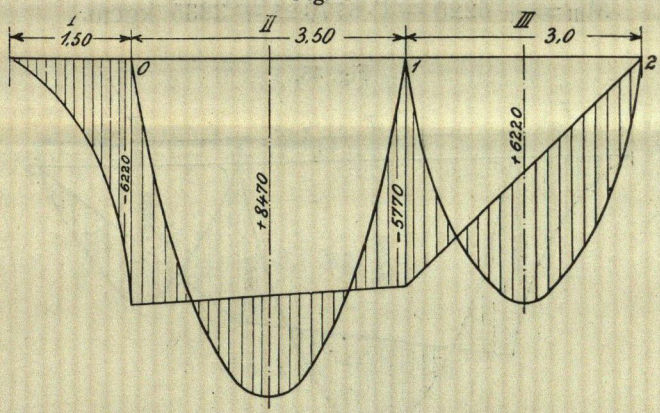
Damit entfallen auf die einzelnen Felder folgende Belastungen:

$3{,}0 \cdot 55{,}3 = 165{,}9$ kg — $3{,}50 \cdot 55{,}3 = 193{,}5$ kg — $1{,}50 \cdot 55{,}3 = 83{,}0$ kg in der oberen Fläche und

$2{,}50 \cdot 44{,}3 = 111{,}0$ kg — $3{,}50 \cdot 44{,}3 = 155{,}0$ kg — $1{,}50 \cdot 44{,}3 = 66{,}50$ kg in der unteren Fläche.

Mittels der eben ermittelten Feldlasten ergeben sich folgende Biegungsmomente in den Holmen:

Fig. 44.



Da die oberen Holme nicht in einem Stück über den Spannturm hinweggehen, sondern in einem gelenkig angeschlossenen Holmschuh über dem Spannturm gestoßen sind, so erscheinen sie als Träger auf drei Stützen mit einem überstehenden Ende. Die unteren Holme sind in derselben Weise abgestützt und gelagert. Mit den in Fig. 44 angegebenen Bezeichnungen betragen die einzelnen Momente:

Feldmoment $M_{II} = 193{,}5 \cdot \frac{350}{8} = 8470$ kgcm.

Feldmoment $M_{III} = 165{,}9 \cdot \frac{300}{8} = 6220$ kgcm.

Stützmoment $M_0 = -83 \cdot \frac{150}{2} = -6220$ kgcm.

$$M_0 \cdot l_{II} + 2\,M_1 \cdot (l_{II} + l_{III}) + M_2 \cdot l_{III} = -\tfrac{1}{4} \cdot (q_{II} \cdot l_{II}^3 + q_{III} \cdot l_{III}^3).$$

$$M_2 = 0;\ q_{II} = 55{,}3 = q_{III}.$$

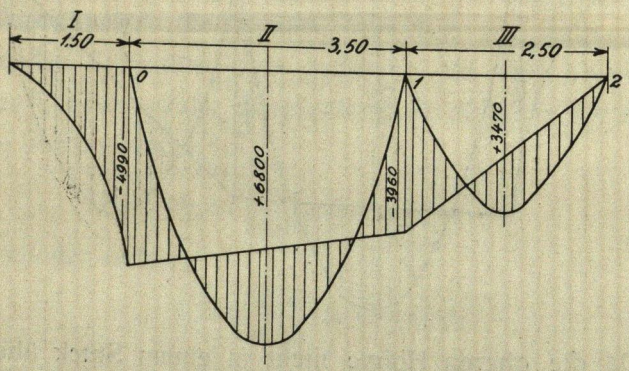
$$-3{,}50 \cdot 62{,}20 + 13{,}0 \cdot M_1 = -\tfrac{1}{4} \cdot (55{,}3 \cdot 3{,}50^3 + 55{,}3 \cdot 3{,}0^3)$$
$$= -968.$$

$$M_1 = -57{,}7 \text{ kgm} = -5770 \text{ kgcm}.$$

Es resultieren

$$M_0 = -6220 \text{ kgcm}.$$
$$M_{II} = +8470 - \tfrac{1}{2} \cdot (6220 + 5770) = +2475 \text{ kgcm}.$$
$$M_1 = -5770 \text{ kgcm}.$$
$$M_{III} = +6220 - \tfrac{1}{2} \cdot 5770 = +3335 \text{ kgcm}.$$

Fig. 45.



Die Biegungsmomente der unteren Fläche mit Bezug auf Fig. 45:

Feldmoment $M_{II} = 155 \cdot \frac{350}{8} = 6800$ kgcm.

Feldmoment $M_{III} = 111 \cdot \frac{250}{8} = 3470$ kgcm.

Stützmoment $M_0 = -66{,}5 \cdot \frac{150}{2} = -4990$ kgcm.

$$M_0 \cdot l_{II} + 2 \cdot M_1 \cdot (l_{II} + l_{III}) + M_2 \cdot l_{III} = -\tfrac{1}{4} \cdot (q_{II} \cdot l_{II}^3 + q_{III} \cdot l_{III}^3)$$

$$-3{,}50 \cdot 49{,}90 + 12{,}0 \cdot M_1 = -\tfrac{1}{4} \cdot (44{,}3 \cdot 3{,}50^3 + 44{,}3 \cdot 2{,}50^3)$$
$$= -650.$$

$$M_1 = -39{,}60 \text{ kgm} = -3960 \text{ kgcm}.$$

Es resultieren

$$M_0 = -4990 \text{ kgcm.}$$
$$M_{II} = +6800 - \tfrac{1}{2} \cdot (4990 + 3960) = +2325 \text{ kgcm.}$$
$$M_{III} = +3470 - \tfrac{1}{2} \cdot 3960 = +1490 \text{ kgcm.}$$
$$M_1 = -3960 \text{ kgcm.}$$

Die mit den Stützdrücken identischen Knotenlasten des Zellensystems ergeben sich wie folgt:

Obere Fläche.

$$T_0 = 83{,}0 + \frac{193{,}5}{2} + \frac{62{,}20}{3{,}50} - \frac{57{,}70}{3{,}50} = 181 \text{ kg.}$$

$$T_1 = \frac{193{,}5}{2} + \frac{165{,}9}{2} + 57{,}70\left(\frac{1}{3{,}50} + \frac{1}{3{,}0}\right) - \frac{62{,}20}{3{,}50} - \frac{M_2}{3{,}0}$$
$$= 197{,}5 \text{ kg.}$$

$$T_2 = \frac{165{,}9}{2} - \frac{57{,}70}{3{,}0} = 63{,}7 \text{ kg.}$$

Untere Fläche.

$$T_0 = 66{,}5 + \frac{155{,}0}{2} + \frac{49{,}90}{3{,}50} - \frac{39{,}60}{3{,}50} = 147 \text{ kg.}$$

$$T_1 = \frac{155}{2} + \frac{111}{2} + 39{,}60\left(\frac{1}{3{,}50} + \frac{1}{2{,}50}\right) - \frac{M_2}{2{,}50} - \frac{49{,}90}{3{,}50}$$
$$= 146 \text{ kg.}$$

$$T_2 = \frac{111}{2} - \frac{39{,}60}{2{,}50} = 39{,}7 \text{ kg.}$$

Die Summe sämtlicher Knotenlasten beträgt:

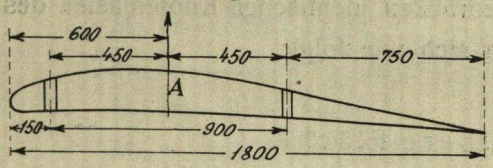
$$2 \cdot (181{,}0 + 197{,}5 + 63{,}7 + 147 + 146 + 39{,}7) = 1550 \text{ kg.}$$

Von den eben ermittelten Biegungsmomenten und Knotenlasten kommen nun folgende Beiträge auf die vordere und hintere Tragwand:

Obere Fläche.

Die Resultierende der Luftkräfte hat einen Abstand von $\frac{1800}{3} = 600$ mm von Vorderkante Fläche und von jedem Holm 450 mm. Auf die einzelnen Holme kommen:

Fig. 46.



$$V = \frac{450}{900} \cdot A = \tfrac{1}{2} A.$$

$$H = \frac{450}{900} \cdot A = \tfrac{1}{2} A$$

Demnach betragen die für den Vorderholm wie für den Hinterholm maßgebenden Biegungsmomente:

$$M_0 = -\tfrac{1}{2} \cdot 6220 = -3110 \text{ kgcm}$$
$$M_{II} = +\tfrac{1}{2} \cdot 2475 = +1238 \quad „$$
$$M_1 = -\tfrac{1}{2} \cdot 5770 = -2885 \quad „$$
$$M_{III} = +\tfrac{1}{2} \cdot 3335 = +1668 \quad „$$

Ebenso die für die vordere wie für die hintere Tragwand maßgebenden Knotenlasten:

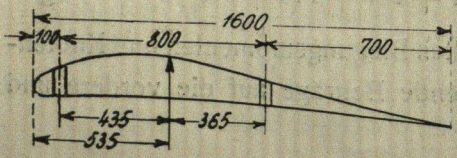
$$T_0 = \tfrac{1}{2} \cdot 181 = 90{,}5 \text{ kg.}$$
$$T_1 = \tfrac{1}{2} \cdot 197{,}5 = 99 \quad „$$
$$T_2 = \tfrac{1}{2} \cdot 63{,}7 = 32 \quad „$$

Untere Fläche.

Abstand der Resultierenden der Luftkräfte von Vorderkante Fläche $\frac{1600}{3} = 535$ mm.

Auf die einzelnen Holme entfallen:

Fig. 47.



$$V = \frac{365}{800} \cdot A = 0{,}455 \text{ A.}$$

$$H = \frac{435}{800} \cdot A = 0{,}545 \text{ A.}$$

Die für den Vorderholm maßgebenden Biegungsmomente:

$$M_0 = -4990 \cdot 0{,}455 = -2270 \text{ kgcm.}$$
$$M_{II} = +2325 \cdot 0{,}455 = +1060 \quad „$$
$$M_1 = -3960 \cdot 0{,}455 = -1800 \quad „$$
$$M_{III} = +1490 \cdot 0{,}455 = +680 \quad „$$

Die für den Hinterholm maßgebenden Biegungsmomente:

$$M_0 = -4990 \cdot 0{,}545 = -2720 \text{ kgcm.}$$
$$M_{II} = +2325 \cdot 0{,}545 = +1265 \quad „$$
$$M_1 = -3960 \cdot 0{,}545 = -2160 \quad „$$
$$M_{III} = +1490 \cdot 0{,}545 = +810 \quad „$$

Die für die vordere Tragwand maßgebenden Knotenlasten:

$$T_0 = 147 \cdot 0{,}455 = 67 \text{ kg}$$
$$T_1 = 146 \cdot 0{,}455 = 66{,}5 \quad „$$
$$T_2 = 39{,}7 \cdot 0{,}455 = 18 \quad „$$

Die für die hintere Tragwand maßgebenden Knotenlasten:

$$T_0 = 147 \cdot 0{,}545 = 80 \text{ kg}$$
$$T_1 = 146 \cdot 0{,}545 = 79{,}5 \quad „$$
$$T_2 = 39{,}7 \cdot 0{,}545 = 22 \quad „$$

Spannkräfte fnfolge Auftrieb.

Fig. 48 und folgende zeigen die Ermittlung der Spannkräfte im Tragsystem der Zelle infolge senkrechter nach oben gerichteter Belastung.

In den Fig. 48b und c sind die Spannkräfte in der vorderen und hinteren Tragwand infolge Auftriebsbelastung ermittelt und dort eingeschrieben.

Das Tragsystem wird hier noch durch den Rückdruck und durch den Einfluß der Stafflung in Spannung versetzt.

Die untere Fläche ist gegenüber der oberen um 30 cm zurückgesetzt, die vorderen Stiele weichen demnach um 25 cm, die hinteren um 15 cm von der senkrechten ab. Da

die Stäbe auf Druck beansprucht werden, so drücken sie die obere Fläche nach vorn, vermindern also dort den Stirn-

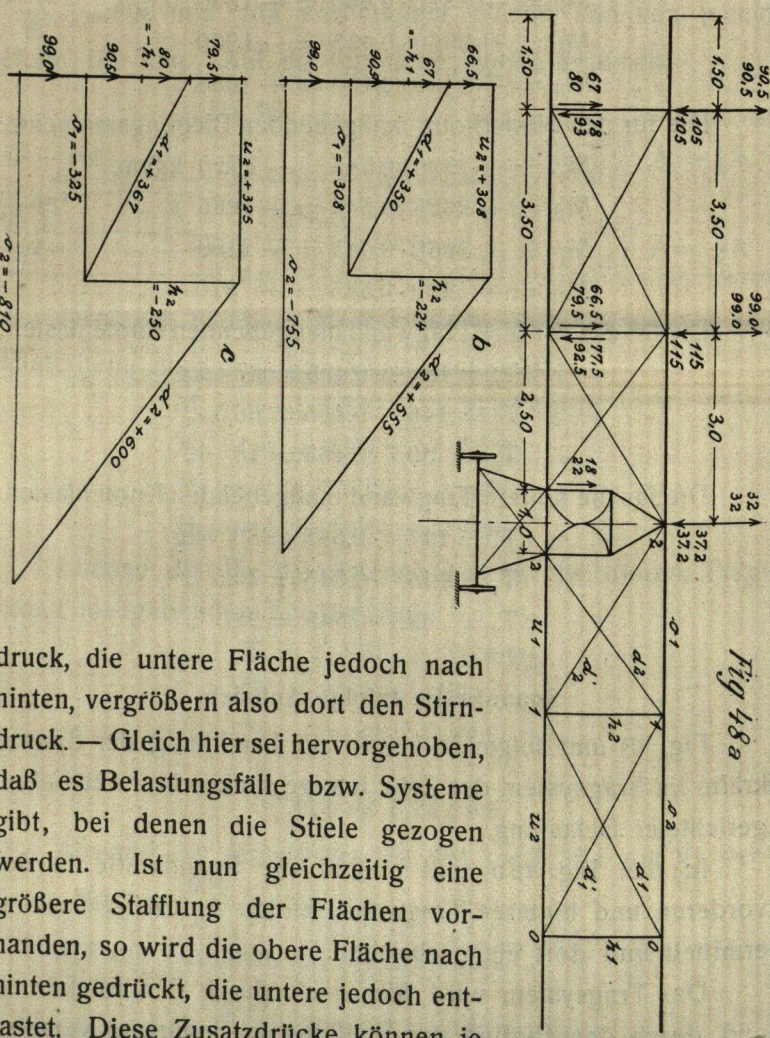


Fig 48a

druck, die untere Fläche jedoch nach hinten, vergrößern also dort den Stirndruck. — Gleich hier sei hervorgehoben, daß es Belastungsfälle bzw. Systeme gibt, bei denen die Stiele gezogen werden. Ist nun gleichzeitig eine größere Stafflung der Flächen vorhanden, so wird die obere Fläche nach hinten gedrückt, die untere jedoch entlastet. Diese Zusatzdrücke können je nach der Anordnung sehr erhebliche Werte annehmen und den Einfluß des Stirndruckes noch wesentlich übertreffen.

Der Stirndruck wird als Horizontalbelastung an den Enden der Stiele eingeführt und zwar mit $\frac{1}{8}$ der dort herr-

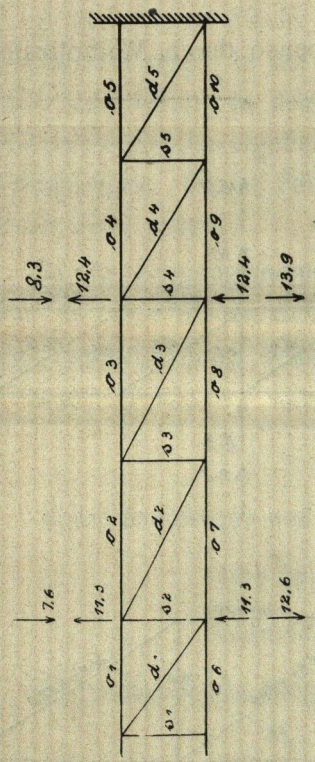


Fig. 49a.

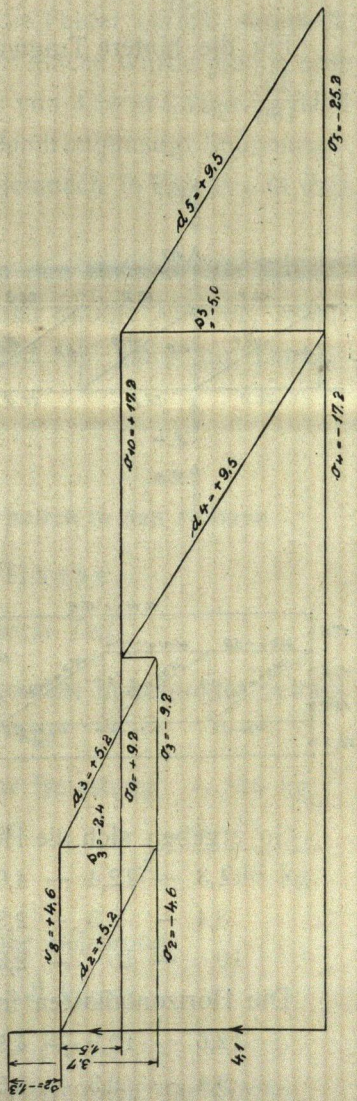


Fig. 49b.

schenden senkrechten Belastung. Der Einfluß der Stafflung wird dadurch berücksichtigt, daß die durch die Neigung der Tragwände verursachten Horizontalkomponenten als Zusatzlasten für die Horizontalträger auftreten. Da in der vorderen Tragwand die Abweichung von der Senkrechten 25 cm beträgt, so ergeben sich bei dem Flächenabstande von 180 cm

die Horizontalkomponenten durch Multiplikation der Auftriebslasten mit $\frac{25}{180}$.

Für die hintere Tragwand ebenso durch Multiplikation mit $\frac{15}{180}$.

Fig. 50a.

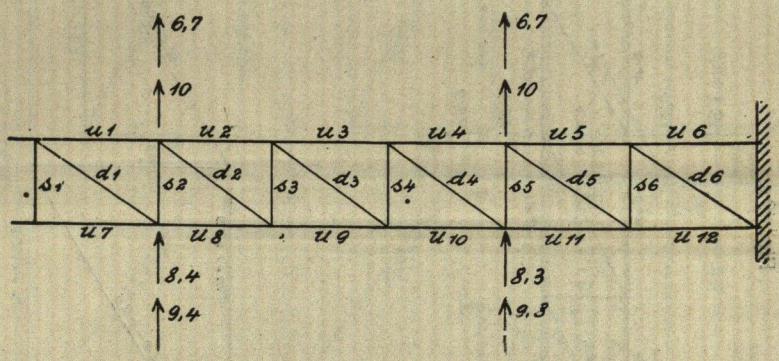
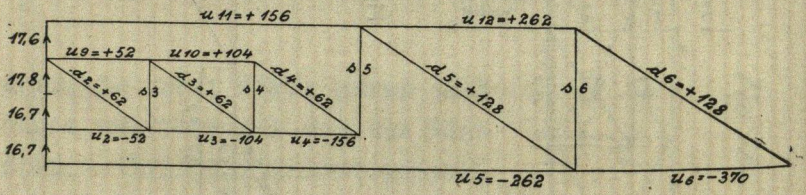


Fig. 50b.



So ergeben sich die Horizontallasten infolge Stirndruck:

11,3 — 12,4 — 4,0 oben, vorn und hinten,
8,4 — 8,3 — 2,3 unten und zwar vorn,
10 — 10 — 2,8 unten und zwar hinten.

Die Horizontallasten infolge Stafflung:

12,6 — 13,9 — 4,5 oben und zwar vorn,
9,4 — 9,3 — 2,5 unten und zwar vorn,
6,7 — 6,7 — 1,8 unten und zwar hinten,
7,6 — 8,3 — 2,7 oben und zwar hinten.

In den Fig. 49 sind die Spannkräfte infolge Stirndruck und Stafflung ermittelt.

In der oberen Fläche sind die Felder einmal unterteilt, wie Fig. 49a zeigt. In der unteren Fläche würde jedoch eine solche Unterteilung in dem Felde von 3,50 m Länge zu flach geneigte Diagonalen ergeben und damit ungünstige Spannungserscheinungen. Dieses Feld ist demnach in Fig. 50a in drei gleiche Teile geteilt.

Da die Biegungsmomente in den Holmen, die Spannkräfte in allen Stäben des Systems infolge Auftrieb, Stirndruck und Stafflung bekannt sind, so kann zur Dimensionierung geschritten werden.

Beanspruchungen und Sicherheiten in den Holmen.

Obere Tragfläche.

Vorderholm, innerer Teil.

Das maßgebende Biegungsmoment in Feldmitte beträgt

$$M_0 = 1668 \text{ kg},$$

die Spannkraft infolge senkrechter Belastung -755 kg,
" " " horizontaler " $+17$ "

$$\Sigma = -738 \text{ kg}.$$

Dieselben Werte bei fünffacher Belastung:

$$M_0 = 5 \cdot 1668 = 8350 \text{ kgcm};$$

$$S = 5 \cdot 738 = 3690 \text{ kg}.$$

Die Beanspruchung wird ermittelt nach der Formel

$$M = M_0 \cdot \frac{n}{n-1}.$$

Das gewählte Profil hat ein Trägheitsmoment

$$J = 5{,}0 \cdot \frac{9{,}0^3}{12} - 2{,}6 \cdot \frac{4{,}0^3}{12} = 290 \text{ cm}^4$$

und ein Widerstandsmoment

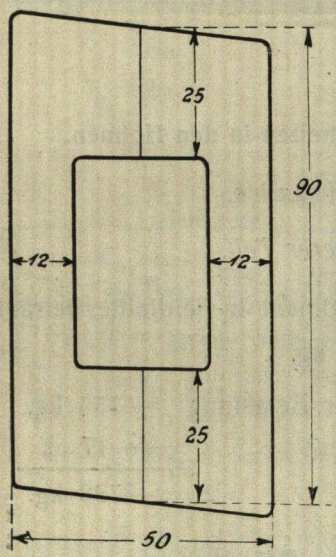
$$W = \frac{290}{4{,}70} = 61{,}8 \text{ cm}^3.$$

Es ergibt sich eine Knicklast von

$$P_k = \frac{10 \cdot 150000 \cdot 290}{300 \cdot 300} = 4840 \text{ kg}$$ und eine

Knicksicherheit $n = \frac{4840}{3690} = 1{,}31.$

Fig. 51.



Gesamtmoment

$$M = 8350 \cdot \frac{1{,}31}{0{,}31} = 35\,300 \text{ kgcm}.$$

Bruchmoment bei einer Materialfestigkeit des Vorderholmes von 700 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

$$M_b = 700 \cdot 61{,}8 = 43\,300 \text{ kgcm}.$$

Sicherheit gegen Bruch

$$n = \frac{43\,300}{35\,300} = 1{,}23;$$

unter Zugrundelegung der Belastung beim normalen Fluge jedoch

$$n \sim 5 \cdot 1{,}23 = 6{,}15.$$

Vorderholm, mittlerer Teil.

Das maßgebende Biegungsmoment $M_0 = 1238$ kgcm.

Spannkraft infolge senkrechter Belastung		— 308 kg,
„ „ horizontaler „		+ 4,6 „
		— 303,4 kg.

Die fünffachen Belastungswerte betragen:

$$M_0 = 5 \cdot 1238 = 6190 \text{ kgcm}; \quad S = 5 \,.\, 303{,}4 = 1516 \text{ kg}.$$

$$J = 4{,}0 \cdot \frac{9{,}0^3}{12} - 2{,}4 \cdot \frac{7{,}0^3}{12} = 174 \text{ cm}^4.$$

$$W = \frac{174}{4{,}7} = 37 \text{ cm}^3.$$

Knicklast

$$P_k = \frac{10 \,.\, 150000 \cdot 174}{350 \cdot 350} = 2130 \text{ kg}.$$

Knicksicherheit $n = \frac{2130}{1516} = 1{,}41.$

Gesamtmoment

$$M = 6190 \cdot \frac{1{,}41}{0{,}41} = 21300 \text{ kgcm}.$$

Bruchmoment

$$M_b = 700 \cdot 37 = 25900 \text{ kgcm}.$$

Sicherheit $n = \frac{25900}{21300} = 1{,}21.$

In bezug auf den einfachen Belastungsfall

$$n \sim 5 \cdot 1{,}21 = 6{,}05.$$

Fig. 52.

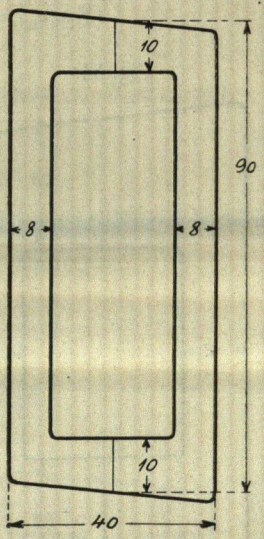
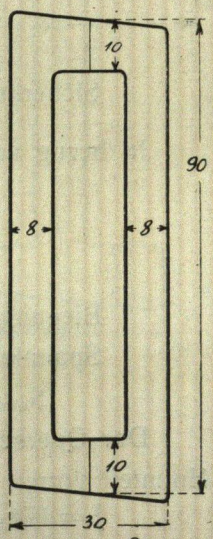


Fig. 53.



Vorderholm, Ausleger.

Biegungsmoment $M_0 = 3110$ kgcm.

$$J = 3{,}0 \,.\, \frac{9{,}0^3}{12} - 1{,}4 \cdot \frac{7{,}0^3}{12} = 142 \text{ cm}^4.$$

$$W = \frac{142}{4{,}7} = 30{,}2 \text{ cm}^3.$$

Beanspruchung $\sigma = \frac{3110}{30{,}2} = 103 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}.$

Sicherheit $n = \frac{700}{103} = 6{,}8.$

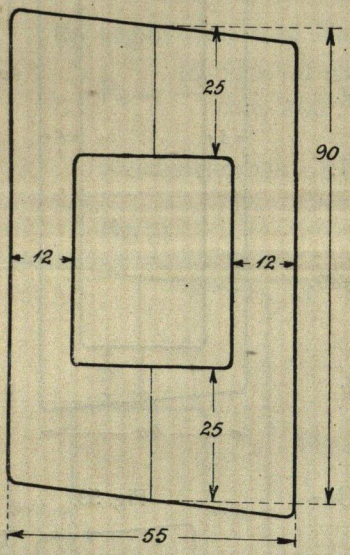
Hinterholm, innerer Teil.

Biegungsmoment $M_0 = 5 \cdot 1668 = 8340$ kgcm.

Spannkraft $S = 5 \cdot 835 = 4175$ kg.

($S_{einfach} = -810 - 25 = -845$ kg.)

Fig. 54.



$$J = 5{,}5 \cdot \frac{9{,}0^3}{12} - 3{,}1 \cdot \frac{4{,}0^3}{12} = 319\,\text{cm}^4.$$

$$W = \frac{319}{4{,}7} = 68{,}0\ \text{cm}^3.$$

Knicklast

$$P_k = \frac{10 \cdot 150000 \cdot 319}{300 \cdot 300} = 5320\ \text{kg}.$$

Knicksicherheit

$$n = \frac{5320}{4175} = 1{,}27.$$

Gesamtmoment

$$M = 8340 \cdot \frac{1{,}27}{0{,}27} = 39300\ \text{kgcm}.$$

Bruchmoment bei einer Materialfestigkeit von 800 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

$$M_b = 800 \cdot 68 = 54400\ \text{kgcm}.$$

Sicherheit $n = \frac{54400}{39300} = 1{,}38.$

In bezug auf den einfachen Belastungsfall

$$n \sim 5 \cdot 1{,}38 = 6{,}9.$$

Hinterholm, mittlerer Teil.

Biegungsmoment $M_0 = 5 \cdot 1238 = 6190$ kgcm.

Spannkraft $S = 5 \cdot 334 = 1670$ kg.

($S_{einfach} = -325 - 9{,}2 = -334$ kg.)

Der Querschnitt ist derselbe wie beim entsprechenden Holmteil vorn.

$J = 174\ \text{cm}^4.$ $W = 37\ \text{cm}^3.$

$P_k = 2130$ kg $\qquad n = \frac{2130}{1670} = 1{,}27.$

$M = 6190 \cdot \frac{1{,}27}{0{,}27} = 29000$ kgcm.

$M_b = 800 \,.\, 37 = 29600$ kgcm.

Sicherheit $n = \frac{29600}{29000} = 1{,}02$; bzw. $5 \cdot 1{,}02 = 5{,}1$.

Hinterholm, Ausleger.

Biegungsmoment, Querschnitt und Beanspruchung haben dieselben Werte wie beim Vorderholm-Ausleger.

Untere Fläche.

Vorderholm, innerer Teil.

Biegungsmoment $M = 680$ kgcm.

Spannkraft infolge

senkrechter Belastung $+308$ kg,

horizontaler „ $+262$ „

$+570$ kg.

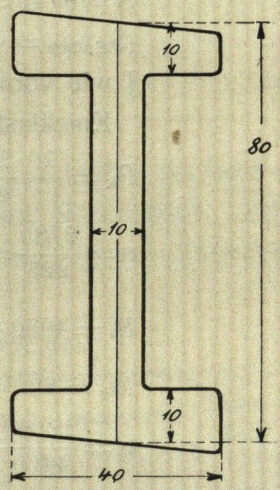
$J = 4{,}0 \cdot \frac{8{,}0^3}{12} - 3{,}0 \cdot \frac{6{,}0^3}{12} = 116$ cm^4.

$W = \frac{116}{4{,}2} = 27{,}6$ cm^3.

Beanspruchung $\sigma = \frac{680}{27{,}6} = 24{,}6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$.

Sicherheit $n = \frac{700}{24{,}6} = 28{,}4$.

Fig. 55.



Vorderholm, mittlerer Teil.

Biegungsmoment $M = 1060$ kgcm.

Spannkraft $S = 0 + 104 = +104$ kg.

J wie vorher 116 cm^4; $W = 27{,}6$ cm^3.

Beanspruchung $\sigma = \frac{1060}{27,6} = 38,4 \frac{kg}{cm^2}$.

Sicherheit $n = \frac{700}{38,4} = 18,2$.

Vorderholm, Ausleger.

$M = 2270$ kgcm.

J wie vorher $= 116$ cm^4; $W = 27,6$ cm^3.

Beanspruchung $\sigma = \frac{2270}{27,6} = 82,4 \frac{kg}{cm^2}$.

$n = \frac{700}{82,4} = 8,5$.

Hinterholm, innerer Teil.

$M_0 = 5 \cdot 810 = 4050$ kgcm.

$S = 5 \cdot 45 = 225$ kg.

($S_{einfach} = + 325 - 370 = - 45$ kg.)

J wie vorn $= 116$ cm^4; $W = 27,6$ cm^3.

Knicklast

$$P_k = \frac{10 \cdot 150000 \cdot 116}{250 \cdot 250} = \frac{17400}{6,25} = 2780 \text{ kg.}$$

$$n = \frac{2780}{225} = 12,3.$$

$$M = 4050 \cdot \frac{12,3}{11,3} = 4400 \text{ kgcm.}$$

$M_b = 800 \cdot 27,6 = 22000$ kgcm,

$n = \frac{22000}{4400} = 5$; bzw. 25.

Hinterholm, mittlerer Teil.

$M_0 = 5 . 1265 = 6325$ kgcm.

$S = 5 \cdot 156 = 780$ kg.

($S_{einfach} = 0 - 156 = - 156$ kg.)

$$P_k = \frac{10 \cdot 150000 \cdot 116}{350 \cdot 350} = 1420{,}0 \text{ kg.}$$

$$n = \frac{1420}{780} = 1{,}82.$$

$$M = 6325 \cdot \frac{1{,}82}{0{,}82} = 14000 \text{ kgcm.}$$

$$M_b = 800 \cdot 27{,}6 = 22000 \text{ kgcm.}$$

$$n = \frac{22000}{14000} = 1{,}57; \text{ bzw. } 5 \cdot 1{,}57 = 7{,}85.$$

Hinterholm, Ausleger.

$$M_0 = 2720 \text{ kgcm; } W = 27{,}6 \text{ cm}^3.$$

$$\sigma = \frac{2720}{27{,}6} = 98{,}5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}.$$

$$n = \frac{800}{98{,}5} = 8{,}1.$$

Innenverspannung.

Die Spannkräfte in den Streben und Seilen der Innenverspannung sind in den Fig. 49 und 50 ermittelt. Die Querschnitte und Sicherheiten sind aus den folgenden Tabellen ersichtlich.

Streben der oberen Fläche.

Strebe	Profil	J cm⁴	l cm	Knicklast	Spannkraft	Sicherheit
s_1	Ø 15/0,5	—	—	—	—	—
s_2	Ø 15/0,5	0,07	90	190 kg	— 1,3 kg	—
s_3	Ø 15/0,8	0,13	90	350 „	— 2,4 „	—
s_4	Ø 20/0,5	0,15	90	400 „	— 0,9 „	—
s_5	Ø 20/1,0	0,23	90	600 „	— 5,0 „	—

Seile der oberen Fläche.

Seil	Profil	Bruchlast	Spannkraft	Sicherheit
d_1	Ø 2,5	450 kg	—	—
d_2	Ø 2,5	450 „	5,2 kg	—
d_3	Ø 3,0	600 „	5,2 „	—
d_4	Ø 3,0	600 „	9,5 „	—
d_5	Ø 3,5	800 „	9,5 „	—

Die Sicherheiten in den Streben und Seilen sind sehr groß, da die auftretenden Kräfte gering, die Querschnitte jedoch schon wegen der schwer kontrollierbaren Montagespannungen und auch aus rein konstruktiven Gründen reichlich kräftig gewählt sind.

Streben der unteren Fläche.

Strebe	Profil	J cm⁴	l cm	Knicklast	Spannkraft	Sicherheit
s_1	Ø 15/0,5	0,07	80	—	—	—
s_2	Ø 15/0,5	0,07	80	240 kg	— 17,8 kg	13,5
s_3	Ø 20/0,5	0,15	80	510 „	— 34,5 „	14,7
s_4	Ø 20/0,5	0,15	80	510 „	— 34,5 „	14,7
s_5	Ø 20/0,8	0,21	80	720 „	— 52,1 „	13,8
s_6	Ø 25/1,0	0,45	80	1550 „	— 68,8 „	22,5

Seile der unteren Fläche.

Seil	Profil	Bruchlast	Spannkraft	Sicherheit
d_1	Ø 2,5	450 kg	—	—
d_2	Ø 3,0	600 „	+ 62 kg	9,7
d_3	Ø 3,0	600 „	+ 62 „	9,7

Seil	Profil	Bruchlast	Spannkraft	Sicherheit
d_4	⌀ 3,0	600 kg	+ 62 kg	9,7
d_5	⌀ 3,5	800 „	+ 128 „	6,25
d_6	⌀ 4,0	1100 „	+ 128 „	8,6

Auch in der unteren Fläche sind die Sicherheiten in den Streben und Seilen verhältnismäßig groß, was mit Rücksicht auf die mehr oder weniger großen Montagespannungen empfehlenswert ist.

Tragstiele der Zelle.

Stiel h_1 in der vorderen Tragwand.

Der Stiel erhält bei Auftriebsbelastung 67 kg Druck.

Gewählt ist ein Rohr von ⌀ 30/1,0. $J_{vorh.} = 0{,}96$ cm⁴.

$$\text{Knicklast} \quad P_k = \frac{10 \cdot 2\,200\,000 \cdot 0{,}96}{180 \cdot 180} = 650 \text{ kg.}$$

$$\text{Knicksicherheit} \quad n = \frac{650}{67} = 9{,}7.$$

Da der Stiel um 25 cm von der Senkrechten abweicht, beträgt seine Systemlänge 182 cm und seine Spannkraft streng genommen $\frac{182}{180} \cdot 67 = 67{,}8$ kg. Wegen der Geringfügigkeit ist beim Sicherheitsnachweis darauf keine Rücksicht genommen.

Stiel h_1 in der hinteren Tragwand.

Der Stiel erhält bei Auftrieb 80 kg Druck.

Rohr wie vorn ⌀ 30/1,0. $J = 0{,}96$ cm⁴.

$$\text{Knicklast} \quad P_k = 650 \text{ kg.}$$

$$\text{Sicherheit} \quad n = \frac{650}{80} = 8{,}1;$$

ohne Berücksichtigung des geringen Einflusses der Staffelung.