



Balkendecken

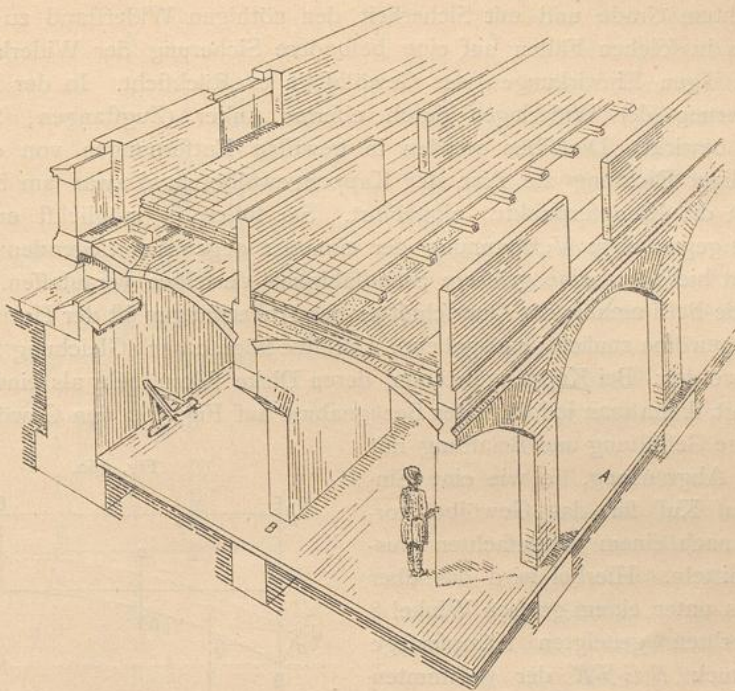
Barkhausen, Georg

Stuttgart, 1895

b) Stärke der Kappengewölbe und ihrer Widerlager

[urn:nbn:de:hbz:466:1-77494](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:466:1-77494)

Fig. 359.



3) eiserne Träger, welche parallel mit den Gewölbaxen laufen und nur an den Enden aufrufen oder auch noch zwischen den Endauflagern durch Säulen oder andere Freistützen, unter Umständen auch durch Unterzüge unterstützt sind (siehe auch unter A, Kap. I, unter a u. b).

Diese Anordnungen gestatten für die Gesamtgestaltung der Kappengewölbe über größeren Räumen dennoch eine möglichst freie Benutzung derselben und namentlich bei der geringen Constructionshöhe solcher Gewölbzüge auch die Anlage entsprechend hoher Licht-, bezw. Thüröffnungen in den Umfangsmauern des zu überdeckenden Raumes, nicht allein in den rechtwinkelig zu den Gewölbaxen stehenden Schildmauern, sondern auch in den eigentlichen Widerlagsmauern. Hierdurch bietet in dieser Beziehung das Kappengewölbe dem Tonnengewölbe gegenüber große Vortheile. Werden dennoch auch bei Kappengewölben für die Licht- oder Thüröffnungen unter Umständen Stichkappen erforderlich, so gilt für diese das schon beim Tonnengewölbe in Art. 133 (S. 161) Mitgetheilte. Von einer eigentlichen Gliederung der Kappengewölbe durch Stichkappen hat man nicht zu sprechen.

b) Stärke der Kappengewölbe und ihrer Widerlager.

Die Stabilitätsuntersuchungen der Kappengewölbe und ihrer Widerlager weichen in ihren Grundlagen von denjenigen der Tonnengewölbe nicht ab, gleichgiltig ob die Kappengewölbe, was allerdings selten der Fall ist, unbelastet bleiben oder ob dieselben eine mehr oder weniger große Belastung zu tragen haben, und es kann in dieser Beziehung auf das bereits im vorhergehenden Kapitel (unter b) Gefagte verwiesen werden. Da aber in der Praxis die Widerlagsmauern der Kappengewölbe nicht immer eine solche Stärke erhalten können, daß dieselben fähig sind, namentlich wenn ihnen eine

176.
Prüfung
der
Gewölbstärke.

bedeutendere Höhe nicht gegeben werden kann, dem Gewölbschube ohne Weiteres in erwünschtem Grade und mit Sicherheit den nöthigen Widerstand zu leisten, so nimmt man in solchen Fällen auf eine besondere Sicherung der Widerlager gegen die nachtheiligen Einwirkungen des Gewölbschubes Rücksicht. In der Regel wird diese Sicherung der Widerlager durch eiserne Anker (Zugstangen, Schlaudern, Schliesen) bewirkt. Dieselben werden in gewissen Entfernungen von einander in rechtwinkliger Richtung zur Axe der Kappengewölbe, und zwar am besten wagrecht durch die Kämpferpunkte, eingeführt. Sie sollen in möglichst erreichbarem Grade eine gegenseitige Verpannung der einander gegenüber liegenden Widerlagsmauern und hierdurch eine grössere Standfähigkeit derselben veranlassen.

Für die Bestimmung des Querschnittes der Ankerstangen ist der Horizontalschub der Kappengewölbe zunächst maßgebend. Derselbe könnte nach Gleichung 159 (S. 192) berechnet werden. Bei Kappengewölben, deren Dicke felten mehr als eine Backsteinlänge beträgt, kann man jedoch unter Bezugnahme auf Fig. 360 den Gewölbschub H , fymmetrische Gestalt und Belastung mit wagrechter Abgrenzung, so wie eine Einwölbung auf Kuf für das Gewölbe vorausgesetzt, nach einem vereinfachten Ausdrucke ermitteln. Hierbei wird das über der meistens unter einem grossen Winkel β zur Wagrechten geneigten Kämpferfuge ruhende Stück $BEJK$ der gefamnten Belastungsfläche $ADKJB$ als verhältnismässig sehr klein vernachlässigt. Der hierdurch begangene Fehler ist an sich geringfügig; er veranlaßt, wie aus Gleichung 159 zu ersehen ist, einen etwas vergrößerten Werth des Gewölbschubes H , was im vorliegenden Falle bei der Stabilitätsbestimmung des Gewölbes und seiner Widerlager nur als günstig zu bezeichnen ist.

Den in Art. 138 (S. 190) für das Tonnengewölbe gegebenen Entwicklungen ganz entsprechend, erhält man alsdann für den Gewölbschub bei Kappengewölben, bei einer Tiefe gleich der Längeneinheit, den einfacheren Ausdruck

$$H = \frac{s^2}{12(d+f)} [6(d+h) + f] \text{ Quadr., bzw. Cub.-Met. . 179.}$$

Eben so ergibt sich bei der eingeführten Vereinfachung für die Belastungsfläche $ADEFB$ der Werth

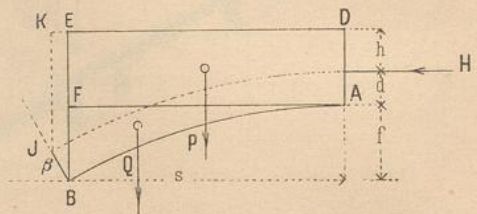
$$G = s \left(d + h + \frac{f}{3} \right) \text{ Quadr., bzw. Cub.-Met. . 180.}$$

In diesen beiden Gleichungen bedeuten s die halbe Spannweite, f die Pfeilhöhe, d die Scheitelfärke und h die Höhe der Belastung über der Rückenlinie im Scheitelthe des Gewölbes (in Met.).

Die Berechnung der Widerlagsstärke würde nach der in Art. 145 (S. 208) gegebenen Gleichung erfolgen können. Da aber bei Kappengewölben die Bestimmung der Widerlagsstärke möglichst schnell schon beim Entwurfe des Gewölbeplanes vorzunehmen ist, so soll hier die dafür maßgebende Ermittlung in einem anderen Gewande gegeben werden.

In Fig. 361 bezeichne A den Höhengchnitt des Widerlagskörpers, dessen Länge l^m beträgt. Der Einfachheit halber und mit der praktischen Ausführung auch

Fig. 360.



mauer bezeichnet, zu beachten, das H und G mit γ und W mit γ_1 multiplicirt werden müssen. Hiernach wird nach Gleichung

$$u = \frac{2aH\gamma - bG\gamma}{2(G\gamma + bk\gamma_1)} = \frac{2aH - bG}{2\left(G + bk\frac{\gamma_1}{\gamma}\right)} \dots\dots\dots 182.$$

Ist in einem besonderen Falle die Stärke b des Widerlagskörpers gegeben, so läßt sich nach Gleichung 182 der Abstand $u = mf$ berechnen. Ist alsdann $u > \frac{b}{2}$ gefunden, so ist kein Gleichgewicht gegen Drehen um die Kante o der Grundfläche des Widerlagers vorhanden; die Abmessung b ist zu gering.

Ist $u = \frac{b}{2}$ berechnet, so ist eben der Grenzwert für den Gleichgewichtszustand gegen Drehen um die Kante o gekennzeichnet; ist endlich $u < \frac{b}{2}$, so tritt schon ein Sicherheitsgrad für die Stabilität der Widerlagsmauer ein. So lange $u = \frac{b}{2}$ oder, wie sich bald ergeben wird, größer als $\frac{b}{2}$ bleibt, ist auf eine Verankerung der Widerlagsmauern Bedacht zu nehmen.

Je weniger sich das berechnete Maß u von dem Maß $\frac{b}{2}$ unterscheidet, desto geringer sind die Entfernungen der Ankerzüge von einander für das Gewölbe zu wählen, wenn dieselben einen entsprechenden Nutzen für das Verspannen der Widerlagsmauern gewähren sollen.

Der Winkel α endlich muß, um die Gefahr gegen das Gleiten auf der Grundfläche des Widerlagers zu berücksichtigen, mindestens gleich oder, der Sicherheit gegen Gleitens halber, kleiner sein, als der Reibungswinkel ρ des für das Widerlager benutzten Mauermaterials.

Aus der Zeichnung ergibt sich

$$\text{tg } \alpha = \frac{H}{G + W} = \frac{u}{y}$$

oder, unter Berücksichtigung der besonderen, vorhin angeführten Einheitsgewichte und da $W = bk$, auch

$$\text{tg } \alpha = \frac{H}{G + bk\frac{\gamma_1}{\gamma}} \dots\dots\dots 183.$$

Soll $\alpha < \rho$, d. h. $\text{tg } \rho > \text{tg } \alpha$ sein, so ist auch $\text{tg } \rho > \text{tg } \alpha$, d. h.

$$\text{tg } \rho > \frac{H}{G + bk\frac{\gamma_1}{\gamma}},$$

mithin $\text{tg } \rho \cdot G + \text{tg } \rho \cdot \frac{k\gamma_1}{\gamma} b > H$; folglich muß auch

$$b > \frac{H - \text{tg } \rho \cdot G}{\text{tg } \rho \cdot k\frac{\gamma_1}{\gamma}} \dots\dots\dots 184.$$

sein. Fände diese Beziehung bei einem gegebenen Werthe von b nicht statt, so

würde die Gefahr des Gleitens des Widerlagskörpers eintreten, selbst wenn das berechnete Mafs von u kleiner als $\frac{b}{2}$ gefunden wäre.

Will man für eine andere wagrechte Schnittfuge unterhalb der Kämpferlinie des Gewölbes in der Widerlagsmauer die Stabilität gegen Drehen und gegen Gleiten prüfen, so hat man nur die wagrechte Ebene entsprechend höher zu verlegen und dieser Lagenveränderung gemäfs die in den Gleichungen 182 u. 184 vorkommenden Werthe a und k danach zu verkleinern. Rükte z. B. die Ebene EE um η Met. höher, so ginge a in $a_1 = a - \eta$ und k in $k_1 = k - \eta$ über.

Derartige Untersuchungen sind bei Widerlagsmauern nicht zu unterlassen, sobald Durchbrechungen derselben, wie bei Thür- und Lichtöffnungen vorkommen.

Noch möge bemerkt werden, dafs unter Einführung verschiedener Werthe für η die zugehörigen berechneten Gröfsen von u auch Punkte in den wagrechten Lagerfugen der Widerlagsmauer liefern, welche der Mittellinie des Druckes in diesem Stützkörper zukommen.

Die Gleichung 182 ist aber weiter zu benutzen, wenn für eine Anlage von Kappengewölben eine Breite b der im Höhengschnitt rechteckigen Widerlagsmauer gefunden werden soll, welche einen bestimmten Grad von Stabilität gegen Drehen besitzt. Setzt man in derselben allgemein $u = nb$, unter n irgend einen echten Bruch verstanden, so erhält man den Ausdruck

$$2nk \frac{\gamma_1}{\gamma} b^2 + (2n + 1) Gb = 2aH.$$

Die Auflösung dieser Gleichung für b liefert

$$b = \frac{1}{4nk \frac{\gamma_1}{\gamma}} \left[-(2n + 1) G \mp \sqrt{16nk \frac{\gamma_1}{\gamma} aH + (2n + 1)^2 G^2} \right]. \quad 185.$$

In derselben ist das positive Vorzeichen der Wurzelgröfse zu verwenden.

Für $n = \frac{1}{2}$, also für $u = \frac{b}{2}$ wird

$$b = \frac{1}{k \frac{\gamma_1}{\gamma}} \left(-G + \sqrt{2k \frac{\gamma_1}{\gamma} aH + G^2} \right).$$

Bei dieser Breite b geht die Mittelkraft R durch den Punkt o der Grundfläche der Widerlagsmauer. Das System befindet sich im Grenzzustande des Gleichgewichtes gegen Drehen.

Für $n = \frac{1}{6}$ wird $u = \frac{b}{6}$ und

$$b = \frac{1}{k \frac{\gamma_1}{\gamma}} \left(-2G + \sqrt{6k \frac{\gamma_1}{\gamma} aH + 4G^2} \right). \quad 186.$$

Bei dieser Abmessung von b trifft die Mittelkraft die Axe op des rechteckigen Querschnittes der Fußfläche des Widerlagers den Grenzpunkt r des inneren Drittels, d. h. den Grenzpunkt des sog. Kernes des Querschnittes, so dafs nun bekanntlich die vorhandene Breite den statischen Anforderungen entspricht, vorausgesetzt, dafs Gleichung 184 für das Gleichgewicht gegen Gleiten keine gröfsere Breite vorschreibt.

Ergiebt sich die Breite b für $n = \frac{1}{6}$ auch hiernach als ausreichend, so ist bei sonst guter Ausführung, bei widerstandsfähigem Material und bei günstigem Verlauf der Mittellinie des Druckes in der Gewölbfläche und im Höhengschnitte des Widerlagers, das Anbringen von Zugankern überflüssig.

178.
Berechnung
der
Verankerungen.

Die Verankerung soll aber angebracht werden, wenn der Schnittpunkt von R mit der Axe op zwischen o und r fällt. Schneidet die Mittelkraft R die verlängerte Axe op ausserhalb der Mauerkante, so soll eine Verstärkung der Widerlagsmauer an sich vorgenommen werden, bis jener Angriffspunkt von R mindestens nahe bei o in die Grundfläche tritt, da für den sicheren Bestand der Mauer einer Verankerung derselben allein eine zu grosse Wirkung nicht zugemuthet werden kann, wenn dabei nicht noch besondere Vorkehrungen getroffen werden.

Die Zuganker können nur in gewissen Entfernungen, nicht dicht neben einander liegend, angebracht werden. Das Gesetz für die Vertheilung des Gewölbschubes an dem zwischen den Angriffstellen der Verankerung liegenden Mauerkörper ist nicht vollständig bekannt, so dass eine scharfe Bestimmung der Beanspruchung, welche jener Mauerkörper durch den Gewölbschub und durch die in bestimmten Abständen eingeführte Verankerung erleidet, augenblicklich noch nicht möglich ist. Würde der Gewölbschub aber z. B. durch widerstandsfähige eiserne Träger für gegebene Gewöblängen auf bestimmte, einander gegenüber liegende feste Stützpunkte der beiden Widerlagsmauern übertragen und alsdann eine Verankerung dieser Stützpunkte vorgenommen, so würde durch eine derartige Vorkehrung eine gänzliche oder theilweise Entlastung des zwischen den Stützpunkten liegenden Mauerkörpers vom Gewölbschube herbeigeführt. Dieser Theil des Widerlagers würde dann mehr oder weniger nur als einfache Begrenzungsmauer auftreten. Bei sehr schwachen Widerlagsmauern der Kappengewölbe ist das Anbringen eiserner Träger rathsam. In der Praxis sind dieselben mehrfach in Anwendung gekommen. Bei solchen Anlagen ist auch die Berechnung der Träger und der zugehörigen Ankerverbindung ohne erhebliche Schwierigkeiten durchzuführen.

Werden diese Vorkehrungen nicht getroffen, so ist für die Berechnung der Zuganker immer nur ein Näherungsverfahren einzuschlagen, welches in seinen Ergebnissen für die praktische Ausführung zweckmässige Werthe liefert.

Der Querschnitt der Zug- oder Ankerstangen ist in den weitaus meisten Fällen eine Kreisfläche. Nur wenn besondere Verhältnisse eine Verbindung solcher Anker mit anderen Bautheilen erfordern oder wenn bestimmte grössere Längen dieser Anker durch volles Mauerwerk geführt werden müssen, erhalten dieselben für diese Längen wohl einen flachen rechteckigen Querschnitt, welcher an den Enden wieder in den kreisförmigen übergeht.

Da die Hauptaufgabe dieser Anker darin besteht, die nachtheiligen Wirkungen des Gewölbschubes auf die Widerlager möglichst zu vermindern und zu diesem Zwecke eine möglichst kräftige gegenseitige Verspannung derselben hervorzurufen, so ist auf eine entsprechend starke Verbindung der Zuganker mit dem Mauerwerkskörper selbst Bedacht zu nehmen. Diese Verbindung erfolgt durch sog. Ankersplinte oder weit besser durch Ankerplatten. Die Ankersplinte bestehen aus Flacheisen, welche durch Oesen greifen, die an den Enden der Zugstangen ausgeschmiedet sind. Die Ankerplatten sind gusseiserne Platten mit quadratischer oder kreisförmiger Grundfläche. Der Querschnitt derselben ist rechteckig oder besser trapezförmig, ab

und zu auch gerippt. Sind die Ankerplatten, wie in der Regel der Fall, aufsen vor der Widerlagsmauer in freier Lage anzubringen, so ist die gerippte Ankerplatte weniger empfehlenswerth, weil die vorspringenden Rippen das Anammeln von Feuchtigkeit oder das Auflagern von Schnee zulassen, wodurch nach und nach die Platten geschädigt werden. Am besten wird für die hier vorliegenden Zwecke der trapezförmige Querschnitt gewählt. Die Enden der Ankerstangen werden durch eine in der Mitte der Platte angebrachte Oeffnung geführt und durch eine geeignete Keil- oder Schraubenverbindung mit den Platten verknüpft.

Eine weitere wesentliche Forderung für das Herbeiführen einer tüchtigen Verankerung der Widerlager geht dahin, daß sowohl die Ankerplatte wie auch die Ankerplatten eine thunlichst große Mauerfläche, bezw. möglichst viele Steinschichten der Widerlagsmauer fassen, um hierdurch die Uebermittlung des Gewölbschubes auf eine größere Fläche und die Verpannung eines größeren Mauerkörpers zu bewirken. Dieser Forderung wird, wie an sich klar, weit besser durch Ankerplatten, als durch die hochkantig aufliegenden Ankerplatte genügt, da ersteren selbst bei nicht sehr großen Seitenabmessungen eine weit größere Lagerfläche gegeben werden kann, als den letzteren, welchen etwa nur 40 bis 60 cm Länge zugewiesen werden.

Sollen Ankerplatte zur Verwendung kommen, so giebt man denselben bei starker Beanspruchung der Zugstangen zweckmäßig eine von den Oefen dieser Stangen ausgehende ästartige Ausbreitung in Form von Buchstaben, Zahlen oder sonst entsprechend gebildeten Ornamenten, wie in Theil III, Band 1 (Abth. I, Abschn. 3, Kap. 5) dieses »Handbuches« näher angegeben ist.

Werden die Zuganker an den Enden mit Schraubengewinden versehen, so sind unter Berücksichtigung des Umstandes, daß beim kräftigen Anziehen der Schraubemutter leicht eine Beanspruchung der Enden der Ankerstange auf Torsion entstehen kann, für die Berechnung der Zugstangen die an der eben bezeichneten Stelle dieses »Handbuches« entwickelten Gleichungen 116 u. 117 (S. 152¹⁶⁹) zu benutzen. Bezeichnet d' den inneren, d den äußeren Gewindedurchmesser und d'' den äußeren Durchmesser der Zugstange, so ist

$$d'' = (1,173 d' + 0,128) \text{ Centim.}; \dots \dots \dots 187.$$

$$d = (1,139 d' + 0,103) \text{ Centim.}, \dots \dots \dots 188.$$

und hierin

$$d' = 0,2 + 0,046 \sqrt{P} \dots \dots \dots 189.$$

zu nehmen.

In Gleichung 189 bezeichnet P die Zugkraft (in Kilogr.), welche die Ankerstange aufzunehmen hat.

Die Beanspruchung der Ankerstange durch Biegung, hervorgerufen von ihrem Eigengewicht, ist hier als gering im Vergleich zur Beanspruchung durch P ohne weiteres vernachlässigt.

Besitzen die Enden der runden Zuganker Oefen, welche die Ankerplatte aufzunehmen haben, so sind die Oefen in ihren Abmessungen, wie in Art. 231 (S. 159¹⁷⁰) des gedachten Bandes dieses »Handbuches« angegeben ist, zu berechnen.

¹⁶⁹) 2. Aufl.: Gleichungen 139 u. 140 (S. 167).

¹⁷⁰) 2. Aufl.: Art. 234 (S. 171).

Unter Verwerthung der hierfür entwickelten Gleichungen 135¹⁷¹⁾ ist

$$\delta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P\pi}{s''} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s''}{s'}}} \text{ Centim.;} \dots \dots \dots 190.$$

$$d = 2 \sqrt{\frac{P}{\pi s''} \left(1 + \frac{s''}{s'}\right)} \text{ Centim.;} \dots \dots \dots 191.$$

$$b = \sqrt{\frac{P}{\pi t} \cdot \frac{s''}{t} \left(1 + \frac{s''}{s'}\right)} \text{ Centim.;} \dots \dots \dots 192.$$

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P\pi}{t} \cdot \frac{s''}{t} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s''}{s'}}} \text{ Centim.} \dots \dots \dots 193.$$

Hierin bezeichnet P wiederum die Zugkraft (in Kilogr.), welche die Ankerstange aufzunehmen hat; s' die zulässige Zugspannung in derselben, welche zu 800 kg für 1 qcm zu nehmen ist; s'' der fog. Lochlaibungsdruck hinter dem Keile, bezw. dem Ankersplinte gleich 1200 kg für 1 qcm, und t die zulässige Scherspannung in der Oefe, bezw. im Keile oder im Ankersplinte, etwa gleich 640 kg für 1 qcm, während δ, d, b, h die aus Fig. 362 zu entnehmenden Bedeutungen für die Oefe, bezw. für den Keil oder den Ankersplint haben.

Die Länge des Keiles ist gleich $2d$ (Gleichung 191) zu nehmen.

Die Oefe wird durch Anstauchen der Enden der Ankerstange gebildet und diese demnach verstärkt. Diese durch d (Gleichung 191) bestimmte Verstärkung ist gröfser, als der Durchmesser d_0 der eigentlichen Stange. Letzterer ist zu berechnen aus der Beziehung

$$\frac{\pi}{4} d_0^2 s' = P,$$

so dafs

$$d_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{P}{s'}} = \approx 1,13 \sqrt{\frac{P}{s'}} \dots \dots \dots 194.$$

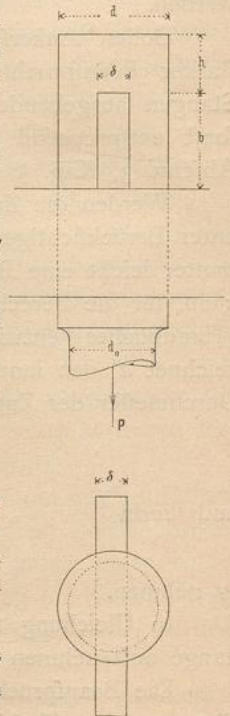
wird. Ankerstangen aus Flacheisen von einer Dicke δ' sind nach Gleichung 137 (S. 160¹⁷²⁾ im angeführten Bande dieses »Handbuches« zu berechnen.

Die Abmessungen der Oefe, bezw. des Keiles oder des Ankersplintes, sind mit Berücksichtigung der Bezeichnungen in Fig. 363

$$\delta = \frac{P}{s'' \delta'}; \quad b' = \frac{P}{\delta'} \cdot \frac{s' + s''}{s' s''} \text{ Centim.;} \dots \dots \dots 195.$$

$$b = \frac{\delta'}{2} \frac{s''}{t}; \quad h = \frac{P}{t \delta'} \text{ Centim.;} \dots \dots \dots 196.$$

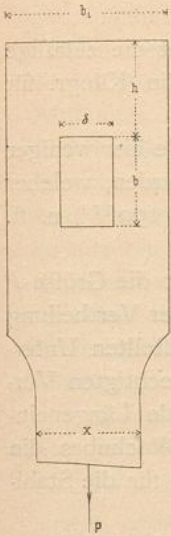
Fig. 362.



171) 2. Aufl.: Gleichungen 161.

172) 2. Aufl.: Gleichung 163 (S. 172).

Fig. 363.



während

$$x = \frac{P}{\delta' s'} \text{ Centim.} \dots \dots \dots 197.$$

zu nehmen ist.

Fallen die berechneten Abmessungen für b , d. i. für die lichte Höhe der Oeffnung der Oese oder für die Höhe des Keiles, wie häufig sich zeigt, unter ein praktisch zulässiges Mafs, so hat man den Unterschied zwischen dem theoretischen Mafse und dem wirklich für b zu wählenden praktischen Mafse dem Werthe h hinzuzufügen, während alle übrigen berechneten Abmessungen unverändert beibehalten werden.

Für die Ankerplatten mit rechteckigem Querschnitte und quadratischer oder kreisrunder Grundfläche können die für Grundplatten im bezeichneten Bande dieses »Handbuches« (Art. 276, S. 182¹⁷³) angeführten Gleichungen 142¹⁷⁴) der Berechnung zu Grunde gelegt werden.

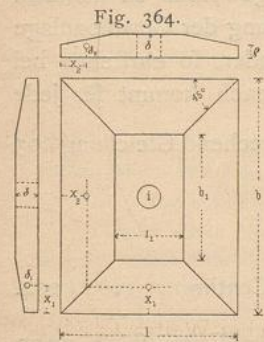
Hiernach wird, wenn F die Grundfläche dieser Platten (in Quadr.-Centim.) und P wie früher der Ankerzug (in Kilogr.) ist

- | | | |
|--|----------------------------------|----------|
| für gewöhnliches Backsteinmauerwerk | $F = \frac{P}{7}$ Quadr.-Centim. | } . 198. |
| „ Klinkermauerwerk in Cement-Mörtel | $F = \frac{P}{12}$ „ „ | |
| „ Mauerwerk aus weniger festen Quadern | $F = \frac{P}{20}$ „ „ | |
| „ Mauerwerk aus sehr festen Quadern | $F = \frac{P}{45}$ „ „ | |

Die Dicke δ in Centim. der Ankerplatten ist

$$\left. \begin{aligned} \delta &= 0,055 \sqrt{P} \text{ für quadratische Platten} \\ \delta &= 0,05 \sqrt{P} \text{ für kreisrunde Platten} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 199.$$

Für trapezförmige Ankerplatten wird unter Bezugnahme auf Fig. 364 die im angeführten Bande (2. Aufl.) dieses »Handbuches« auf S. 223 gegebene Gleichung 194 füglich benutzt werden können. Hiernach wird



$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= 0,1 x_1 \sqrt{\frac{\sigma_1}{3} \cdot \frac{3l - 2x_1}{l - 2x_1}} \text{ Centim.} \\ \delta_2 &= 0,1 x_2 \sqrt{\frac{\sigma_1}{3} \cdot \frac{3b - 2x_2}{b - 2x_2}} \text{ Centim.} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 200.$$

Die erforderliche Grundfläche F ist nach Abzug der Fläche i für die Oeffnung in der Mitte, durch welche der Zuganker geführt wird, bei einem rechteckigen Auflager, wobei l oder b gewählt werden kann,

$$lb - i = F = \frac{P}{\sigma_1}, \text{ d. h. } lb = \frac{P}{\sigma_1} + i$$

und bei quadratischem Auflager in der Seitenlänge

$$b = \sqrt{\frac{P}{\sigma_1} + i} \dots \dots \dots 201.$$

173) 2. Aufl.: Art. 282, S. 197.
174) 2. Aufl.: Gleichungen 174.

Bei diesen Platten ist $l = b$, so dass eine der Gleichungen 200 zur Berechnung von δ_1 , bezw. δ_{11} , zu benutzen ist.

Die Randstärke ρ beträgt passend 2 cm. Die GröÙe σ_1 bezeichnet die zuläÙige Pressung auf das Mauerwerk, gegen welches sich die Platte legt (in Kilogr. für 1 qcm); der Werth hierfür geht aus Gleichung 198 hervor.

Für gerippte Platten, welche aus dem früher angegebenen Grunde hier weniger in Betracht kommen, muss auf den Gang der Berechnung verwiesen werden, welcher im mehrfach erwähnten Bande dieses »Handbuches« in Art. 294 (S. 199¹⁷⁵) u. ff. betreten ist.

179.
Zugkraft
und
Zahl der
Ankerfängen.

In den für die Verankerung auszuführenden Berechnungen spielt die GröÙe P der Zugkraft eine Rolle. Dieselbe hängt vom Gewölbenschub und von der Vertheilung desselben auf das Gewölbwiderlager ab. Sieht man von peinlich angeestellten Untersuchungen ab, deren Ergebnisse doch nur auf mehr oder weniger berechtigten Voraussetzungen beruhen, so kann man unter der Annahme eines für jede Längeneinheit der Widerlagsmauern gleichförmig und stetig vertheilten Gewölbenschubes die GröÙe von P leicht fest setzen, welche für die Zuganker entsteht und für die Stabilität der Widerlagsmauern verwerthet werden soll.

Ist L Met. die ganze Länge des Kappengewölbes zwischen den Stirnmauern, H der Gewölbeschub für 1 m Länge nach Gleichung 179 (S. 264) und γ das Einheitsgewicht des Wölbmaterials in Kilogr. für 1 cbm, so wird der gesammte Gewölbeschub

$$P = L H \gamma \text{ Kilogr.} \dots \dots \dots 202.$$

Ist m die Zahl der in bestimmten Abständen zwischen den Stirnmauern einander parallel einzulegenden runden Zuganker, deren Durchmesser je d_0 Centim. beträgt, so ist, wenn s' wie früher die zuläÙige Zugspannung (in Kilogr. für 1 qcm) bezeichnet,

$$m \frac{\pi}{4} d_0^2 s' = L H \gamma, \text{ d. h.}$$

$$m = \frac{4 L H \gamma}{\pi d_0^2 s'} \dots \dots \dots 203.$$

Ist d_0 von vornherein in einem praktischen MafÙe für die Zuganker fest gesetzt, so ergibt sich nach Gleichung 203 die erforderliche Anzahl derselben. In der Regel ist d_0 zu 2½, 3 bis höchstens zu 5 cm bei gewöhnlichen Kappengewölbem zu nehmen.

Meistens ist aber die Zahl m vorweg durch die Plangestaltung der Gewölbanlage bestimmt. Liegen dieselben in gleichen Abständen von einander, so entstehen bei m Zugfängen $m + 1$ Abtheilungen der Länge L , und demnach kommt für jede Zugfänge eine Kraft $\frac{L H \gamma}{m + 1}$ in Rechnung. Hiernach wird entsprechend Gleichung 203

$$\frac{\pi}{4} d_0^2 s' = \frac{L H \gamma}{m + 1} \text{ oder}$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{L H \gamma}{(m + 1) s'}} = \infty 1,13 \sqrt{\frac{L H \gamma}{(m + 1) s'}} \text{ Centim.} \dots \dots 204.$$

Liegen dagegen die Zuganker in Abständen von ungleicher Weite, so ist, wenn l Met. die gröÙte überhaupt vorkommende Entfernung zwischen zwei Ankerfängen bezeichnet,

$$d_0 = \infty 1,13 \sqrt{\frac{l H \gamma}{s'}} \text{ Centim.} \dots \dots \dots 205.$$

¹⁷⁵) 2. Aufl.: Art. 299 (S. 224).

zu nehmen. Hierbei ist zu bemerken, dass derartige ungleich weite Abstände für die Zuganker dem ganzen System weniger zuträglich sind und daher thunlichst vermieden werden müssen. Sehr große Abweichungen zwischen den einzelnen Weiten dürfen überhaupt nicht zugelassen werden. Bei geringfügigen Unterschieden in diesen Abständen ist dann für alle Ankerfängen der nach Gleichung 205 für l Met. berechnete Durchmesser d_0 beizubehalten. Von Wichtigkeit ist bei der Verankerung der Kappengewölbe auch das Anbringen von Zugankern an jeder Stirnmauer, um hierdurch dem erfahrungsmäßig leicht eintretenden Ausweichen, bezw. Abreißen der Widerlagsmauern an den Ecken des Raumes möglichst vorzubeugen. Die Entfernungen der Zuganker von einander sollen höchstens 4 m, unter Umständen weit weniger betragen weil bei zu großen Abständen der Verankerungen die nicht ausreichend starken Widerlagsmauern zwischen den Ankerzügen sich leicht ausbauchen und Mauerriße erhalten.

Beispiel. Ein aus Backstein vom Einheitsgewichte 1,6 ausgeführtes Kappengewölbe mit einem Kreisbogen als Leitlinie ist 14,5 m lang; die Spannweite $2s$ desselben beträgt 3 m, also $s = 1,5$ m, und die Pfeilhöhe $f = 0,4$ m, also etwas über $\frac{1}{8}$ der Spannweite. Das Gewölbe stützt sich gegen Widerlagsmauern, welche ordnungsmäßig aus festem Kalkstein vom Einheitsgewichte 2,6 ausgeführt sind; die Stärke b derselben beträgt 0,60 m und die Höhe $h = 8,2$ m; die Kämpferhöhe a des Gewölbes beträgt 3 m. Das Gewölbe ist 1 Stein = 0,25 m stark, in den Zwickeln mit Backstein ausgemauert und mit einem Bretterfußboden überlagert. Die Nutzlast des Gewölbes ist zu 400 kg für 1 qm Grundfläche bestimmt. Dieser nicht ganz geringfügigen Nutzlast entsprechend, wird die als wagrecht abgeglichene Belastungsfläche, auf Backstein-Material zurückgeführt, zu einer Höhe $h = \frac{400}{1600} = 0,25$ m im Scheitelthe des Gewölbes gefunden. Vom Zurückführen des Gewichtes des mit Sand unterlagerten Bretterfußbodens ist hier abgesehen.

180.
Beispiel.

1) Prüfung der Gewölbstärke. Man erhält nach Gleichung 179

$$H = \frac{1,5^2}{12(0,25 + 0,4)} [6(0,25 + 0,25) + 0,4] = 0,97 \text{ Quadr., bezw. Cub.-Met.}$$

Nach der Tabelle auf S. 202 überschreitet dieser Werth die für H berechnete Größe bei 1 Stein starken Gewölben um 0,1 qm, bleibt aber von H für $1\frac{1}{2}$ Stein Stärke um 1,06 qm entfernt. Wird nun das Gewölbe auch etwas stärker gepreßt, als Gleichung 145 angiebt, so kann diese etwas größere Preßung bei kleineren Gewölben doch zugelassen und die Gewölbstärke d zu 1 Stein als genügend angesehen werden.

Nach Gleichung 180 wird

$$G = 1,5 \left(0,25 + 0,25 + \frac{0,4}{3} \right) = 0,95 \text{ Quadr., bezw. Cub.-Met.}$$

Bei den gegebenen Abmessungen wird, um den Normaldruck N in der Kämpferfuge bestimmen zu können, zuvor $\sin \alpha = \frac{s}{r}$ und, da $\frac{f}{s} = \frac{s}{2r - f}$, also $r = \frac{f^2 + s^2}{2f}$ ist,

$$\sin \alpha = \frac{2fs}{f^2 + s^2} = \frac{1,20}{2,41} = 0,4979 = \approx 0,5,$$

mithin nahezu und hier genau genug $\alpha = 30$ Grad. Hiernach ist zufolge Gleichung 152

$$N = 0,97 \cos 30^\circ + 0,95 \sin 30^\circ = 0,97 \cdot 0,866 + 0,95 \cdot 0,5 = 1,325 \text{ Quadr., bezw. Cub.-Met.}$$

Dieser Werth bleibt nach der Tabelle auf S. 202 weit unter der für den Normaldruck N bei einem 1 Stein starken Gewölbe berechneten Größe. Mithin ist auch in dieser Beziehung die ausgeführte Gewölbstärke hinreichend.

2) Prüfung der Widerlagsstärke. Das Gewicht des Wölbmaterials sammt Belastung ist $\gamma = 1600$ kg für 1 cbm, während das Eigengewicht des Mauerwerkes vom Widerlager $\gamma_1 = 2600$ kg für 1 cbm beträgt. Unter Benutzung von Gleichung 182 wird

$$u = \frac{2 \cdot 3 \cdot 0,97 - 0,6 \cdot 0,95}{2 \left(0,95 + 0,6 \cdot 8,2 \cdot \frac{2600}{1600} \right)} = \frac{5,25}{17,89} = 0,293 \text{ m,}$$

also ganz wenig kleiner als $\frac{b}{2} = \frac{0,60}{2} = 0,30$ m.

Dieses Ergebnis bedingt eine kräftige Verankerung der Widerlagsmauern.

Für den Gleichgewichtszustand gegen Gleiten muß bei der Annahme des Reibungswinkels ρ für Kalkfeinmauerwerk als $\operatorname{tg} \rho = 0,7$ nach Gleichung 184

$$0,60 > \frac{0,97 - 0,7 \cdot 0,95}{0,7 \cdot 8,2 \cdot \frac{2600}{1600}},$$

d. h. $0,60 > 0,326$ fein.

Solches ist hier der Fall, mithin ist Sicherheit gegen Gleiten der Widerlagsmauer auf ihrer Grundfläche bekundet.

Für eine in der wagrechten Kämpferebene liegende Fuge der Widerlagsmauer geht die Größe k der Gleichung 184 in $k_1 = k - \gamma = 8,2 - 3 = 5,2^m$ über, und nun muß

$$0,60 > \frac{0,97 - 0,7 \cdot 0,95}{0,7 \cdot 5,2 \cdot \frac{2600}{1600}},$$

d. i. $0,60 > 0,515$ fein. Auch für diese Fuge ist demnach keine Gefahr in Bezug auf Gleiten vorhanden.

3) Berechnung der Verankerung. Wird die Zahl m der in gleichen Entfernungen von einander zwischen den Stirnmauern angebrachten Zugankern zu 4 genommen, so ist die Entfernung derselben $l = \frac{14,2}{4+1} = 2,9^m$ und somit die Zugkraft P für dieselbe gleich dem resultierenden Gewölbschub für diese Länge l , d. h. $P = 2,9 \cdot 0,97 \cdot 1600 = 4500,8$ kg, wofür 4500 kg gesetzt werden sollen.

Für diese Beanspruchung würde nach Gleichung 194, worin s' unter Berücksichtigung der Torsion, welche die Ankerfange erleiden kann, gleich 600 kg für 1 qcm gesetzt werden soll, der Durchmesser der Stange

$$d_0 = \infty 1,13 \sqrt{\frac{4500}{600}} = 3,09 \text{ cm},$$

Die Zuganker erhalten aber an ihren Enden Schraubengewinde, deren äußerer Ring von etwa 1 mm Tiefe nicht als tragfähig gelten kann. Aus diesem Grunde ist zunächst nach Gleichung 189, worin auch $s' = 600$ kg berücksichtigt ist, der innere Durchmesser zu bestimmen als

$$d' = 0,2 + 0,046 \sqrt{4500} = 0,2 + 3,086 = 3,286 \text{ cm},$$

wofür 3,3 cm genommen werden sollen.

Alsdann wird nach Gleichung 188 der äußere Gewindedurchmesser $d = (1,139 \cdot 3,3 + 0,108) = 3,86$ cm und endlich nach Gleichung 187 der Durchmesser der Zugfange selbst

$$d'' = 1,173 \cdot 3,3 + 0,128 = 3,99 \text{ cm},$$

wofür selbstredend 4 cm zu nehmen sind. Dieser Durchmesser ist den Zwischenankern statt des Maßes $d_0 = \infty 3$ cm zu geben.

Die Ankerfängen an jeder Stirnmauer können, da der für ihre Spannung maßgebende resultierende Gewölbschub zu $\frac{l}{2} H \gamma = \frac{2,9}{2} \cdot 0,97 \cdot 1600 = 2250$ kg angenommen werden darf, einen geringeren Durchmesser als die Zwischenanker erhalten. Für den inneren Gewindedurchmesser würde nach Gleichung 189

$$d' = 0,2 + 0,046 \sqrt{2250} = 2,38 \text{ cm}$$

und hiernach der Durchmesser der Stange nach Gleichung 187

$$d'' = 1,173 \cdot 2,38 + 0,128 = 2,91 \text{ cm},$$

wofür $d'' = 3$ cm zu nehmen ist.

Vielfach giebt man aber in der Praxis diesen Stirnankern denselben Durchmesser, wie den Zwischenankern.

Giebt man den runden Zugankern an ihren Enden Oefen, welche Keile, bzw. Splinte aufnehmen, die dann zweckmäßig auf Ankerplatten lagern, so sind zur Berechnung derselben die Gleichungen 190 bis 193 und die Gleichung 197 anzuwenden. Man erhält alsdann nach Gleichung 194 den Stangendurchmesser, da s' beim Nichteintreten einer Torsion bei derartigen Ankern gleich 800 kg für 1 qcm gesetzt werden kann,

$$d_0 = 1,13 \sqrt{\frac{5400}{800}} = 2,94 = \infty 3 \text{ cm}$$

und nun der Reihe nach entsprechend den Gleichungen 190 bis 193

$$\delta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4500 \cdot 3,1416}{1200} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1200}{800}}} = \infty 1,1 \text{ cm},$$

$$d = 2 \sqrt{\frac{4500}{3,1416 \cdot 1200} \left(1 + \frac{1200}{800}\right)} = \infty 3,8 \text{ cm},$$

$$b = \sqrt{\frac{4500}{3,1416 \cdot 640} \cdot \frac{1200}{640} \left(1 + \frac{1200}{800}\right)} = \infty 3,3 \text{ cm},$$

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4500 \cdot 3,1416}{640} \cdot \frac{1200}{640} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1200}{800}}} = \infty 2 \text{ cm}.$$

Ein Vergleich der Ergebnisse der Rechnung fällt hinsichtlich der Zugstangen zu Gunsten der zuletzt betrachteten Anordnungen von Oefen mit Keilen aus, da die Anwendung von Ankerftangen mit Schraubengewinden an den Enden einen grösseren Aufwand an Material für die Verankerung bedingt.

4) Berechnung der Ankerplatten. Sollen quadratische gusseiserne Ankerplatten mit einfachem rechteckigen Querschnitte Verwendung finden, so ist bei der Beanspruchung $P = 4500 \text{ kg}$ die Dicke derselben nach Gleichung

$$\delta = 0,055 \sqrt{4500} = 3,69 \text{ cm},$$

wofür rund $3,7 \text{ cm}$ genommen werden.

Bei runden Zugankern mit Schraubengewinden an den Enden ist die Oeffnung in der Ankerplatte um etwa 2 mm grösser als der Durchmesser der Zugstange zu nehmen, so dass dieselbe nach der angestellten Rechnung $4,2 \text{ cm}$ betragen würde. Die Grundfläche dieser Oeffnung ist demnach $i = \frac{\pi}{4} 4,2^2 = \infty 13,85 \text{ qcm}$.

Hiernach wird unter Benutzung von Gleichung 201

$$b = \sqrt{\frac{4500}{\sigma'} + 13,85} \text{ Centim.}$$

Nimmt man für Mauerwerk aus festem Kalkstein in Kalkmörtel die zulässige Beanspruchung σ' für 1 qcm zu 10 kg an, so ist $b = \sqrt{450 + 13,85} = \sqrt{463,85} = 21,54 \text{ cm}$ oder abgerundet $= 22 \text{ cm}$.

Da aber die Ankerplatten eine möglichst grosse Fläche der Widerlagsmauer überlagern sollen, so ist es rathsam, die Seitenlänge b dieser Platten zu 30 cm anzunehmen. Alsdann ist die Grundfläche derselben, welche die von den Zugankern herbeigeführte Pressung auszuhalten hat, gleich $F = (30^2 - 13,85) = 886,15 \text{ qcm}$ und folglich $\sigma' = \frac{4500}{886,15} = \infty 5 \text{ kg}$ für 1 qcm , eine Beanspruchung, welche selbst bei weniger festem Kalksteinmauerwerk zulässig ist.

Werden die vorhin berechneten Zugstangen mit Oefen und Keilen zur Ausführung gebracht, so würden zweckmässig dieselben Ankerplatten für die Unterlagerung der Keile, bezw. für die Verankerung benutzt.

Würden statt der Ankerplatten Ankerplinte für die Verankerung genommen, welche zur Erzielung einer möglichst grossen Auflagerfläche oberhalb der Oefe oder oberhalb und unterhalb derselben entsprechend geäfst angeordnet werden könnten, so müsste, wenn aus practischen Gründen, die Breite der Auflagerfläche derselben statt der für den Keil berechneten Breite $\delta = 1,1 \text{ cm}$ zu 2 cm gewählt würde, bei der Beanspruchung $\sigma' = 10 \text{ kg}$ für 1 qcm Mauerfläche die gesammte Länge l der Aeste eines Ankerplintes gleich $\frac{4500}{10 \cdot 2} = 225 \text{ cm}$ sein, d. h. bei 4 auch in geschwungenen Linien geführten Aesten würde jeder derselben oberhalb und unterhalb derselben rund 57 cm in der Erstreckung messen. Bei Verminderung dieser erstreckten Länge würde selbstverständlich die Beanspruchung σ' des Mauerwerkes wachsen.

Nach den gemachten Angaben hätte also die Durchbildung der Ankerplinte zu erfolgen.

Zuweilen werden zur Verstärkung der Widerlager für Kappengewölbe und auch wohl für ihr Ursprungsgewölbe, das Tonnengewölbe, Strebepfeiler in gewissen Entfernungen von der Widerlagsmauer in Vorschlag gebracht. Sind, wie bei den Kreuzgewölben sich zeigen wird, Strebepfeiler, bezw. Strebebogen bei solchen Anlagen vortheilhaft am Platze, so ist dieses bei Kappengewölben oder Tonnengewölben weit weniger der Fall. Bei diesen Gewölben ist, wie bereits bei der Verankerung der-

181.
Strebepfeiler.

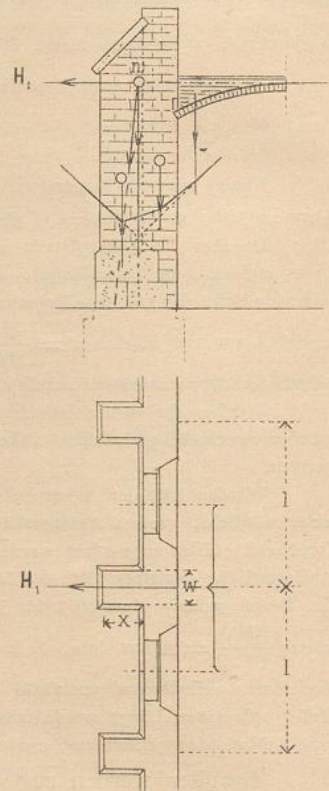
felben gefagt ist, keine Vereinigung des Gewölbschubes an einzelnen abgegrenzten Theilen der Widerlager vorhanden. Die Voraussetzungen, welche hinsichtlich der Vertheilung des Gewölbschubes auf eine Widerlagsmauer mit Strebepfeilern zu Grunde gelegt werden, lassen noch Zweifel zu. Obgleich dieser Vorwurf auch die Verankerung treffen muß, so ist doch durch solche Anlagen erfahrungsmäßig eine entsprechende Erhöhung der Standficherheit der mit nicht ganz zureichender Stärke behafteten Widerlagsmauern in verhältnismäßig einfacher Weise herbeizuführen. Die in der Höhe der Kämpferebene eingezogene Verankerung vermag eine bessere Verspannung der Widerlagsmauern und eine größere Gegenwirkung für den Gewölbschub auszuüben, als die vorgelegten Strebepfeiler, welche etwa eine erhöhte Standfähigkeit der an sich nicht ganz genügend starken Widerlagsmauern der Kappengewölbe vermitteln sollen.

Müffen aus besonderen Gründen statt der Zuganker Strebepfeiler angeordnet werden, so ist, unter Beachtung des in Art. 178 (S. 268) für die Unterfuchung der zwischen den Zugankern liegenden Mauertheile der Widerlager Gefagten, für die Strebepfeiler selbst eine Entfernung von über 4 m von Mitte zu Mitte thunlichst zu vermeiden. Die parallel zur Widerlagsmauer auftretende Breite der Strebepfeiler sollte nicht unter 38, bezw. 40 cm betragen. Ihre rechtwinkelig zum Widerlager antretende Dicke ist durch statische Unterfuchung zu bestimmen. Das bei dieser Unterfuchung zu benutzende Verfahren entspricht im Wesen ganz dem in Art. 143 (S. 197) über die Ermittlung der Stabilität eines Tonnengewölbes und seines Widerlagers Mitgetheilten. Im Besonderen ist hier nur zu berücksichtigen, daß unter Bezugnahme auf Fig. 365 der für den Körper des Strebepfeilers in Betracht kommende, im Punkte n angreifende resultirende Horizontalschub $H_1 = lH$ Quadr., bezw. Cub.-Met. bei der graphischen Unterfuchung oder als $H_1 = lH\gamma$ Kilogr. bei der rechnerischen Ermittlung der Stabilität des Strebepfeilers einzuführen ist. Die Größen H und γ haben die früher angegebene Bedeutung; l ist die Entfernung der Strebepfeiler von Mitte zu Mitte (in Met.).

Die Gewichtsbestimmung vom Körper des einzelnen Strebepfeilers erfolgt selbstredend unter Berücksichtigung der meistens von vornherein angenommenen Breite w desselben, einer vorläufig zu wählenden Dicke x und des Eigengewichtes γ_1 des betreffenden Mauermaterials. Bei der graphischen Methode ist dieses Mauermaterial auf das Wölbmaterial, wie früher besprochen, zu reduciren. Die für den Höhenschnitt des Strebepfeilers darzustellende Mittellinie des Druckes darf die Kernfläche des Querschnittes desselben nicht verlassen; außerdem muß das Gleichgewicht gegen Gleiten in bekannter Weise bekundet sein.

Findet die Einwölbung der Kappengewölbe nicht auf »Kuf«, sondern auf »Stich« oder »Schwalbenschwanz« statt, wovon unter c des Näheren mitgetheilt wird, so

Fig. 365.



entstehen schmale, neben einander liegende Wölbstreifen, Wölbcharen oder Zonen, welche ihr Widerlager sowohl an den eigentlichen Widerlagsmauern, als auch an den Stirnmauern und endlich auch an den Seitenflächen einzelner Zonen selbst finden.

In jedem Falle treten bei dieser Art der Einwölbung die sämtlichen das Gewölbe begrenzenden Raumtheile als Widerlager auf, so daß auch die Stirnmauern einem Gewölbschube ausgesetzt sind, welcher hier sogar für die einzelnen Wölbcharen in verschiedenen Höhen über der Kämpferebene des Gewölbes angreift und auch in Bezug auf einander verschieden groß ausfällt.

Ist die Leitlinie des Kappengewölbes, wie eigentlich stets der Fall, ein flacher Kreisbogen, so ist die Leitlinie jeder einzelnen Wölbchar ein elliptischer Bogen, dessen Kämpferpunkte in verschieden hoch gelegenen wagrechten Ebenen auftreten. Im Allgemeinen sind demnach, streng genommen, die einzelnen Wölbcharen schmale einhöftige oder ansteigende Gewölbe, deren Gewölbschub nach den in Art. 146 (S. 209) gemachten Angaben ermittelt werden kann, wenn dabei nur die Annahme gemacht wird, daß etwas abweichend von der Wirklichkeit die seitlichen Begrenzungsflächen dieser Wölbcharen einander parallelen, lothrechten Ebenen angehören, während dieselben, streng genommen, in verschieden zu einander geneigten Ebenen liegen, welche die Laibungsfläche des Gewölbes nach Ellipsenstücken durchschneiden, deren Grundrifsprojectionen ebenfalls gekrümmt sind. Die Abweichung von der Wirklichkeit noch weiter zu treiben und auch Abstand zu nehmen von der Eigenschaft der Wölbcharen, wonach dieselben als einhöftige kleine Gewölbe erscheinen, um dieselben ohne Weiteres als symmetrisch geformte und symmetrisch belastete Gewölbe anzusehen, könnte füglich unterlassen werden, da die statische Untersuchung einhöftiger Gewölbe nebst deren Widerlager keine erheblich zu nennende Schwierigkeiten verursacht, so fern überhaupt nicht sehr hoch gespannte theoretische Entwicklungen angestellt werden sollen.

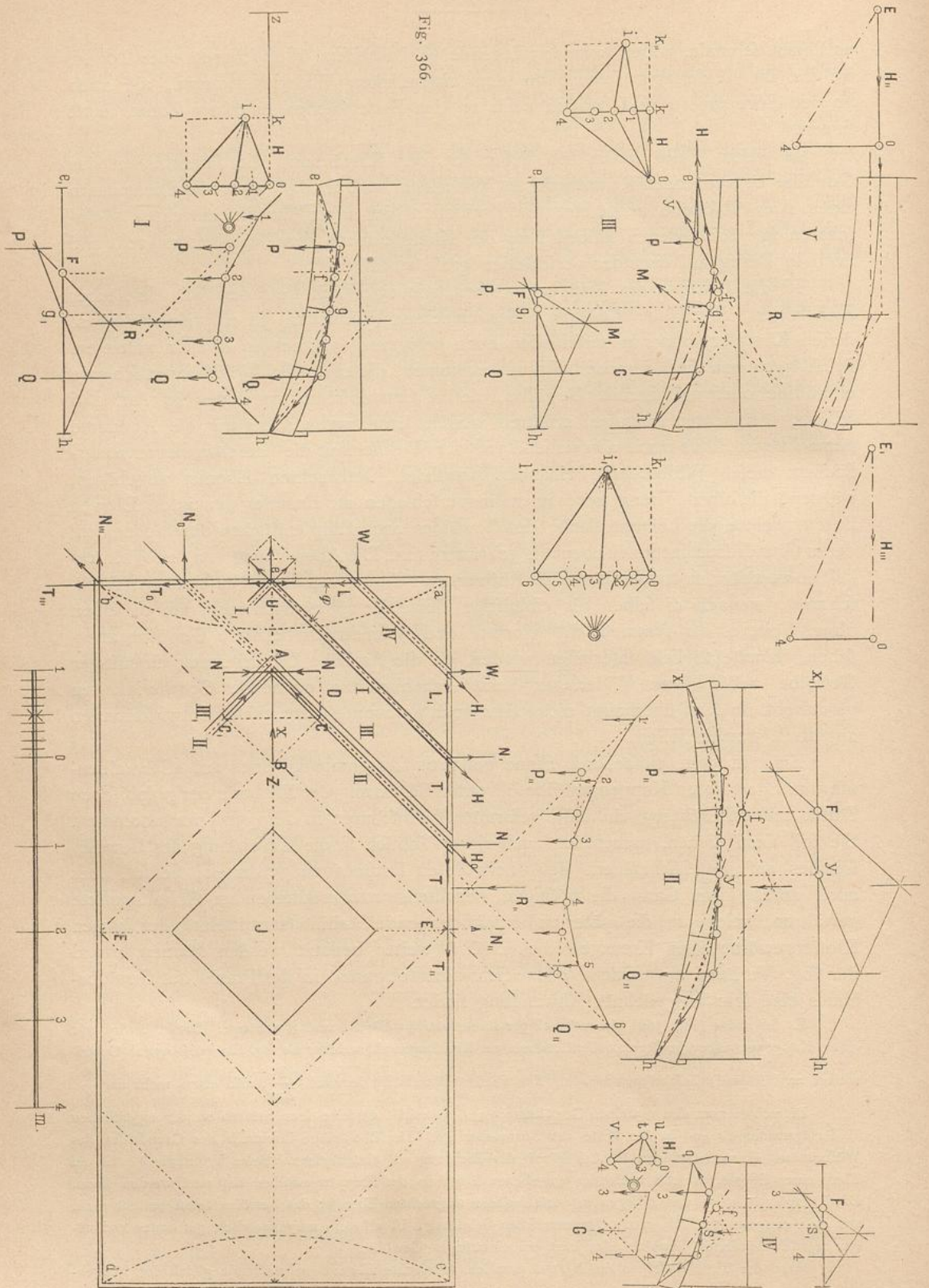
Eine in dem einfacheren Sinne geführte Untersuchung eines auf »Schwalbenschwanz« gewölbten Kappengewölbes ist unter Benutzung der Methode der graphischen Statik unter Beachtung einhöftig geformter Wölbcharen in Fig. 366 vorgenommen. Sie soll dazu dienen, namentlich auch einen Einblick in die Einwirkung des Gewölbschubes auf die Stirnmauern des überwölbten Raumes zu gewinnen; sie soll aber auch durch ihren Gang die nöthigen, beachtenswerth erscheinenden Anhaltspunkte gewähren, welche für die später zu berücksichtigende Stabilitätsmittlung der flachen Klostersgewölbe, der Kreuzgewölbe u. s. f. weiter benutzt werden können, zumal der sog. Verband auf »Stich« oder »Schwalbenschwanz« in der Praxis des Gewölbebaues eine sehr ausgedehnte Anwendung findet.

Es sei $abcd$ (Fig. 366) ein rechteckiger Raum von 4 m Breite und 8 m Länge. Derselbe wird mit einem Kappengewölbe überdeckt, dessen Leitlinie ein Kreisbogen ist, welcher als sog. Kreuzrifsbogen (Centriwinkel = 60 Grad) beschrieben wurde. Das Pfeilverhältniß ist demnach $\frac{1}{7,46}$, also etwas mehr als $\frac{1}{8}$.

Betrachtet man den einzelnen Wölbstreifen l , so erhält derselbe seine Stützen an der eigentlichen Widerlagsmauer ac und in der Mitte der Stirnmauer ab . Derselbe möge innerhalb des Grundrisses des Wölbtraumes einen beliebigen Winkel φ mit der Richtung ab einschließen. Seine Wöblinie he ist ein Theil einer Ellipse, welche nach der gegebenen Leitlinie des Kappengewölbes bestimmt werden kann. Die Kämpferpunkte h und e liegen in verschiedenen wagrechten Ebenen; das Gewölbe selbst besteht nicht aus zwei congruenten Hälften mit symmetrischer Belastung, ist also ein unsymmetrisch geformtes und unsymmetrisch belastetes Gewölbe oder kurz ein einhöftiges Gewölbe.

Wird die Tiefe desselben durch zwei parallele lothrechte Ebenen im Abstände gleich der Längen-

Fig. 366.



einheit begrenzt genommen, so kann bei gegebener oder gewählter Gewölbstärke und bei fest gesetzter Belastung, zurückgeführt auf Wölbmaterial, die Stabilitätsuntersuchung des Gewölbstreifens ganz so vorgenommen werden, wie in Art. 146 (S. 209) mitgeteilt ist. Als Nutzlast sind 320 kg für 1 qm angenommen; die Gewölbstärke ist zu 1 Stein fest gesetzt.

Für die Bestimmung der Mittellinie des Druckes egh wurde die durch h und g gelegte Gerade als Polaraxe benutzt. Der in g wirkende Gewölbdruck ergibt sich als zi , bezw. iz im zugehörigen Kräftepolygon. Die in e und h auftretenden Drucke der Kämpferfugen bestimmen sich in demselben Polygon als oi , bezw. ia .

Der Horizontalschub H wird als wagrechte Seitenkraft des Gewölbschubes zi der Größe nach gleich ok , bezw. ko . Denselben Werth besitzen auch die wagrechten Seitenkräfte der bezeichneten Kämpferdrücke, welche die Widerlagsmauer und die Stirnmauer treffen. Die lothrechten Seitenkräfte dieser Drücke sind oz , bezw. za .

In der Zeichnung ist $ok = 0,78$ m gefunden und, da die Basis oz , welche für die Verwandlung der Belastungsfläche des Gewölbes benutzt wurde, gleich 2 m ist, so wird

$$H = 2 \cdot 0,78 = 1,56 \text{ Quadr.}, \text{ bezw. Cub.-Met.}$$

Diesem Werthe von H entspricht nach der auf S. 202 enthaltenen Tabelle eine Gewölbstärke von 1 Stein bis $1\frac{1}{2}$ Stein. Da aber nach einer vorgenommenen Prüfung der größte Normaldruck N für die Kämpferfuge h nur $2 \cdot 0,88 = 1,76$ Quadr., bezw. Cub.-Met. beträgt, so wird hierfür nach der angeführten Tabelle eine Gewölbstärke von 1 Stein ausreichend. Bei Kappengewölben kann dieser Werth von N Berücksichtigung finden, und dieserhalb ist die Gewölbstärke mit 1 Stein gelassen. Dieselbe kann durchgängig beibehalten werden, weil innerhalb des Wölbgebietes $aE\mathcal{Y}U$ kein einziger mit I parallel laufender Wölbstreifen eine größere Spannweite als I selbst erhält. Dasselbe gilt auch für die übrigen Wölbgebiete, welche dieselbe Anordnung der Wölbstreifen erfahren, wie das bezeichnete Gebiet.

Für den mit I zusammentretenden Streifen I_1 , welcher vollständig der Gewölbzone I entspricht, entsteht derselbe Gewölbdruck $H = 1,56$ Quadr., bezw. Cub.-Met.

Die Dicke dieser Streifen ist aber nicht 1 m, sondern nur gleich einer Backsteindicke, also gleich 0,065 m; mithin kommt für jeden Streifen nur ein Horizontalschub von $1,56 \cdot 0,065 = \approx 0,1$ Quadr., bezw. Cub.-Met. oder bei einem Gewicht des Wölbmaterials von 1600 kg für 1 cbm von $1600 \cdot 0,1 = 160$ kg in Betracht.

Erfetzt man diese beiden Kräfte je für sich durch zwei Seitenkräfte, welche in der Richtung der Scheitellinie $U\mathcal{Y}$ des Gewölbes und rechtwinkelig hierzu wirkend genommen werden, so vereinigen sich die ersten beiden zu einer wagrechten Mittelkraft $U = 2H \cdot \sin \varphi$; d. i. im vorliegenden Falle, da $\varphi = 45$ Grad gewählt ist, $U = 2 \cdot 160 \frac{1}{\sqrt{2}} = 226,24$ kg. Diese Kraft trifft die Stirnmauer rechtwinkelig im Punkte e . Die beiden anderen in e angreifenden Seitenkräfte, welche an der inneren Seitenfläche der Stirnmauern wirken, halten sich im Gleichgewicht.

Die Widerlagsmauer ac erhält vom Streifen I den Horizontalschub $H = 160$ kg. Die rechtwinkelig zu ac gerichtete Seitenkraft desselben wird also $N_1 = H \cdot \cos \varphi = 160 \frac{1}{\sqrt{2}} = 113,12$ kg, während die mit ac zusammenfallende, in der Kämpferlinie des Gewölbes wirkende Seitenkraft $T_1 = H \cdot \sin \varphi$, d. h. auch hier gleich $160 \frac{1}{\sqrt{2}} = 113,12$ kg wird.

Für einen Streifen IV entsteht wiederum ein einhüftiges elliptisches Gewölbe, dessen Stabilitätsuntersuchung in der Zeichnung in bekannter Weise unter Benutzung der Polaraxe rs vorgenommen wurde. Der Horizontalschub H_1 ergab sich zu $0,81 \cdot 2 = 0,62$ Quadr., bezw. Cub.-Met., mithin für die Dicke 0,065 m des Streifens zu

$$0,62 \cdot 0,065 \cdot 1600 = 64,48 \text{ kg.}$$

Dieser Schub trifft sowohl die Stirnmauer ab , als auch die Widerlagsmauer ac .

Für die rechtwinkelig zu diesen Mauerkörpern wirkenden Seitenkräfte erhält man $W = H_1 \cdot \sin \varphi$ und $W_1 = H_1 \cdot \cos \varphi$, während für die mit den Begrenzungen ab , bezw. ac zusammenfallenden Seitenkräfte sich $L = H_1 \cdot \cos \varphi$ und $L_1 = H_1 \cdot \sin \varphi$ ergibt. Für $\varphi = 45$ Grad ist $\sin \varphi = \cos \varphi$ und demnach

$$W = W_1 = L = L_1 = 64,48 \frac{1}{\sqrt{2}} = \approx 45,6 \text{ kg.}$$

Von Wichtigkeit ist die Prüfung des Einflusses, welchen die Gewölbchübe der sämtlichen Wölbstreifen zwischen dem mittleren Stirnstreifen und der Mittellinie EE des Gewölbes auf die Stirnmauer

und die eigentlichen Widerlagsmauern ausüben. Jeder Gewölbstreifen liefert jedoch nur scheinbar in der Richtung $\mathcal{J}U$, d. h. in der Scheitellinie des Gewölbes, einen vom Gewölbchube, welcher in einem Einzelfstreifen auftritt, abhängigen Horizontalchub. Möchte derselbe an sich betrachtet auch keine übermäßige Gröfse aufweisen, da sehr weit gespannte Kappengewölbe nicht in Anwendung kommen, so ist doch für dieselben sehr häufig eine nicht unbedeutende Länge unter Benutzung des Verbandes auf Schwalbenschwanz erfahrungsmässig zur Ausführung gekommen, ohne dafs bei diesen langen Gewölben übermäßig starke Stirnmauern erforderlich geworden wären. Wollte man einfach die erwähnten, scheinbar auftretenden einzelnen Horizontalchübe, welche in $\mathcal{J}U$ liegen, summiren, so müfste bei sehr grofser Länge von $\mathcal{J}U$ ein sehr grofser resultirender Horizontalchub für die Stirnmauer in ihrer Mitte entstehen, der schliesslich, so darf man folgern, bei unendlicher Länge des Gewölbes auch unendlich grofs werden müfste. Dieser Annahme, wonach ein solches Addiren der einzelnen Horizontalchübe zulässig sei, widerspricht aber aller Erfahrung. Sehr lange Gänge sind häufig mit Kappengewölben im genannten Verbands ausgeführt und doch haben nicht unverhältnismässig starke Stirnmauern den gefamnten entspringenden Horizontalchub ohne besonderen Nachtheil für ihren ficheren Bestand und ohne besondere Verankerung aufgenommen. Die Stärke dieser Stirnmauern würde sicherlich nicht genügend gewesen sein, wenn der durch Summirung der einzelnen Horizontalchübe der äufserst zahlreichen Wölbstreifen ermittelte gefamnte Horizontalchub für die Stirnmauern thatächlich zur Wirkung gekommen wäre.

So liefert in dem hier behandelten Beispiele der Elementarstreifen I in Gemeinschaft mit dem ihm zugehörigen Streifen I_1 einen Horizontalchub $U = 226,24$ kg. Nimmt man an, ein Gewölbe von derselben Spannweite gleich 4 m besitze statt 8 m Länge eine solche von 80 m, so würde die Scheitellinie von U bis Z , für welche nur die Wölbstreifen von gleicher Spannweite mit dem Streifen I zunächst einmal in Frage kommen mögen, bei dem Winkel $\varphi = 45$ Grad eine Länge von $\frac{80}{2} - 2 = 38$ m besitzen. Für diese Strecke würden unter Berücksichtigung von 1 cm starken Fugen zwischen den Streifen

$$\frac{38}{0,075 \frac{1}{\sin \varphi}} = \frac{38}{0,075 \sqrt{2}} = \infty 380 \text{ Schichten}$$

auftreten und folglich ein resultirender Horizontalchub allein für diese Schichten von $380 \cdot 226,24$ kg $= \infty 85972$ kg entstehen, mithin sich ein Ergebnis herausstellen, welches als widersinnig gelten mufs.

Um zu anderen, der Wirklichkeit näher kommenden Ergebnissen zu gelangen, möge das Gewölbe bis zu den Streifen III und III_1 ausgeführt sein. Würden die unterstützenden Lehrgerüste auch beseitigt sein, so würde dieses Gewölbstück sich frei schwebend erhalten, so fern jeder Streifen zwischen I und III an sich im Gleichgewichte ist. Sein Widerlager findet derselbe in seiner Gefamtheit an der Mauer ac und an den bis zur Stirnmauer eingefügten Streifen des Gewölbstückes.

Bei der praktischen Ausführung, wovon später noch näher die Rede ist, wird nach und nach jedes Paar zusammengehöriger Wölbstreifen für sich gewölbt; von geschickten Arbeitern oft aus freier Hand nur unter Benutzung einer sog. Lehre. Diese besteht aus einem Brettstücke, dessen obere Begrenzung der Wöblinie des Streifens entspricht. Hiernach können auf Schwalbenschwanz eingewölbte Kappen in der Nähe ihres Scheitels selbst eine Oeffnung behalten; eine Anordnung, welche auch häufiger getroffen wird.

Werden die Gewölbstreifen II und II_1 eingewölbt, so stützen sich dieselben gegen die Widerlagsmauer und gegen die Streifen III und III_1 derart, dafs die Kämpferdrücke für jene Mauer und für diese Streifen in einer Gröfse und Richtung auftreten, welche dem möglichst kleinsten Gewölbchube der Elementarstreifen II , bezw. II_1 entsprechen. Die Form und Belastung dieser Streifen sind aber in vollständiger Uebereinstimmung mit dem Streifen I , so dafs die statische Unterfuchung derselben auch übereinstimmende Ergebnisse mit derjenigen für I liefern mufs.

Die in den Kämpferpunkten e und h für sich entspringenden Kämpferdrücke sind wieder oi , bezw. iq . Die wagrechten Seitenkräfte $H = ok$, bezw. lq , die lothrechten Seitenkräfte $o2$, bezw. $2q$ ergeben sich gleichfalls wie früher. Die von II und II_1 auf den Gewölbkörper, welcher bis III , bezw. III_1 reicht, übertragenen Horizontalchübe setzen sich zu einem in der Scheitellinie des Gewölbes wirkenden Horizontalchub $X = 2D = 2H \sin \varphi$ zusammen, während die senkrecht zur Scheitellinie genommenen Seitenkräfte N der Horizontalchübe H sich im Gleichgewicht halten und die Endflächen der Streifen II und II_1 gegen einander pressen. Der noch übrig bleibende resultirende Horizontalchub X trifft zunächst die angrenzenden Gewölbstreifen III und III_1 im Punkte A und mufs selbstverständlich durch ein entsprechendes Widerlager aufgehoben werden.

Denkt man sich, die Streifen III und III_1 wären von dem übrigen bis zur Stirnmauer gehenden Gewölbkörper um irgend eine Strecke nach \mathcal{J} zu abgerückt, nimmt man ferner an, der übrige Gewölb-

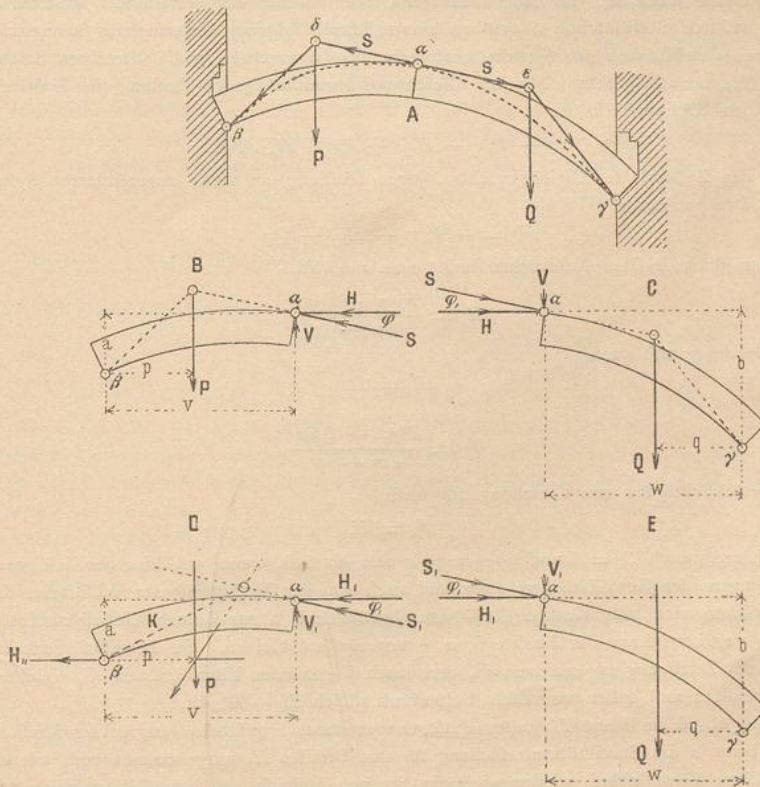
körper sei in der Richtung der Scheitellinie durchschnitten und lege sich mit den von einander getrennten Scheitelflächen seiner Streifen gegen eine unpressbare Strebe, deren Axe in der Scheitellinie liegt, so das das eine Ende dieser Strebe sich gegen die Stirnmauer, das andere Ende derselben gegen die auspringende Ecke der Streifen III und III_1 setzt; so würde diese Strebe den Horizontalschub X allein aufnehmen und unmittelbar auf die Stirnmauer übertragen, ohne den übrigen Gewölbkörper in Mitleidenschaft zu ziehen.

Würde man für jeden Streifen so verfahren, so käme allerdings die Summe aller Horizontalschübe X der zahlreichen Wölbstreifen von I nach γ ohne Weiteres auf die Stirnmauer, und zwar in der Richtung der Scheitellinie des Gewölbes. Eine derartige Anordnung einer Strebe findet aber nicht statt; ein gewaltig großer resultirender Horizontalschub für die Stirnmauer in der Scheitellinie des Gewölbes kann gleichfalls bei sehr langen Gewölben erfahrungsmässig nicht auftreten.

Betrachtet man zuvor den Gleichgewichtszustand eines Streifens III , bezw. III_1 , in dem die in A wirkende Kraft BA von der Grösse X nach der Richtung dieser Streifen in die beiden wagrechten Seitenkräfte CA und C_1A zerlegt wird, welche offenbar jede gleich H der Streifen II und II_1 ist, so wird die Beanspruchung der Streifen III und III_1 durch diese Kräfte CA , bezw. C_1A und ihre gegebene Beaufschlagung bekannt.

Um danach die Stabilitätsuntersuchung des in solcher Weise beanspruchten einhäufigen Gewölbstreifens III vornehmen zu können, möge folgende Erörterung Platz greifen.

Fig. 367.



In Fig. 367 sei für das einhäufige Gewölbstück A der möglichst kleinste Gewölbefschub als S und die dazu gehörige, ganz in der Gewölbfläche verbleibende Mittellinie des Druckes als $\beta a \gamma$ gefunden. Um die Grösse dieses Gewölbefschubes durch Rechnung zu bestimmen, ist für die Gewölbtheile B und C der Gewölbefschub S unter Berücksichtigung seiner Richtung gegen die beiden Gewölbtheile in die beiden Seitenkräfte H und V zerlegt, wovon erstere wagrecht, letztere lothrecht wirkend genommen sind. Für den Gleichgewichtszustand gegen Drehung erhält man im System B , bezogen auf den Drehpunkt β , bei

der bekannten Lage der Punkte α, β und der bekannten Gröfse, Richtung und Lage der Kraft P , welche das Gewicht des Gewölbtheiles B darstellt,

$$0 = -Vv - Ha + Pp. \quad 206.$$

Für den Theil C mit dem Gewichte Q ergibt sich in Bezug auf den Drehpunkt γ in entsprechender Weise

$$0 = -Vw + Hb - Qq. \quad 207.$$

Aus diesen beiden Gleichungen erhält man

$$H = \frac{Ppw + Qqv}{aw + bv}, \quad 208.$$

$$V = \frac{Ppb - Qqa}{aw + bv}, \quad 209.$$

und hiernach würde die Gröfse des Gewölbchubes S aus der Gleichung

$$S = \sqrt{H^2 + V^2} \quad 210.$$

zu bestimmen sein.

Der Neigungswinkel φ des Gewölbchubes S zur Wagrechten wird ermittelt durch

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{V}{H}. \quad 211.$$

Wirkt nun an dem sonst unveränderten Gewölbstücke A noch eine gegen den Punkt β nach aufsen gerichtete wagrechte Kraft H_1 , von ganz beliebiger Gröfse, so läßt sich der Einfluß, welchen diese hinzugefügte Kraft auf den Gewölb Schub S ausüben könnte, durch folgende Untersuchung kennzeichnen.

Der neue Gewölb Schub sei S_1 ; die entsprechenden wagrechten und lothrechten Seitenkräfte desselben mögen H_1 , bezw. V_1 sein. Für den Gleichgewichtszustand gegen Drehung im Kräftefytem D ist in Bezug auf den Drehpunkt β

$$0 = -V_1v - H_1a + Pp + H_1, \text{ Null}, \quad 212.$$

während für den Zustand des Gleichgewichtes gegen Drehung im sonst unveränderten System E unter Annahme des Drehpunktes γ

$$0 = -V_1w + H_1b - Qq \quad 213.$$

sein muß. Aus diesen beiden Ausdrücken findet man zunächst

$$H_1 = \frac{Ppw + Qqv}{aw + bv}, \quad 214.$$

d. h. nach Gleichung 208 auch

$$H_1 = H$$

und sodann

$$V_1 = \frac{Ppb - Qqa}{aw + bv}, \quad 215.$$

oder unter Berücksichtigung von Gleichung 209 auch

$$V_1 = V.$$

Danach muß auch $S_1 = S$ und $\operatorname{tg} \varphi_1 = \operatorname{tg} \varphi$ sein, so daß, wenn, wie hier der Fall, von elastischen Formveränderungen des Gewölbkörpers ganz und auch von der Verkittung der Wölbsteine durch Mörtel vorläufig abgesehen wird, die Kraft H_1 auf den Gewölb Schub S gar keinen Einfluß ausübt, sobald nur P, Q und die gegebene Lage der Punkte β, α, γ unverändert bleiben. Sie beeinflusst jedoch, wie ohne Weiteres aus der Zeichnung zu erkennen ist, den durch β gehenden Kämpferdruck K , welcher aus H_1, P und $S_1 = S$ resultirt und dessen wagrechte Seitenkraft gleich $H_1 + H_1$ ist.

In Fig. 366 ist im Plane III unter Einfügen der durch e geführten wagrechten Kraft $H = ok$ des Streifens II, bezw. I die Stabilitätsuntersuchung für den Streifen III vorgenommen und, wie es sein muß, der in g wirkfame Gewölb Schub wieder wie beim Streifen I gleich zi , bezw. i_2 gefunden, während die wagrechte Seitenkraft ok , des in e wirkenden Druckes $oi = 2H$ ist.

Da auf den Gewölb Schub der einzelnen Streifen durch Hinzufügen jener gekennzeichneten Kraft H_1 , kein Einfluß ausgeübt wird, da ferner eine unmittelbare Uebertragung der wagrechten Seitenkräfte der stets größer werdenden Kämpferdrücke in den Scheitellinien der einzelnen Streifen von Z bis U auf die Stirnmauer in der Scheitellinie des Gewölbes nicht als zulässig erachtet werden kann, so muß die Beanspruchung des zwischen Z und U , bezw. zwischen \mathcal{Z} und U befindlichen Gewölbkörpers, so wie auch der zwischen a und dem Streifen I, bezw. zwischen b und I_1 befindliche Streifen von der Beschaffenheit

des Streifens *IV* in anderer Weise erfolgen, als im Vorhergegangenen und hier und dort wohl auch bei der Stabilitätsuntersuchung von Kreuzgewölben, wenn deren Gewölbkappen gleichfalls auf Schwalbenschwanz-Verband ausgeführt werden sollen, angenommen wurde.

Hinsichtlich der Beanspruchung der Stirnmauern durch den Gewölbschub wird man der Wahrheit durch folgende Betrachtung näher kommen.

Der gefamte Gewölbkörper besteht im Allgemeinen aus verhältnismäßig kleinen Wölbsteinen, die, wenn auch entsprechend auf Schwalbenschwanz-Verband geordnet, dennoch das Zerlegen in lauter neben einander liegende Zonen gestatten, welche sämmtlich in ihren Axen unter einem Winkel φ zur Stirnmauer gerichtet sind und für die größte Länge des Gewölbes über die Scheitellinie desselben mit hinweg laufen. Die Einwölbung nach einer solchen parallelen Zonenlage würde, wenn die Stützflächen derselben gegen Gleiten gesichert sind und auch sonst der Gleichgewichtszustand der einzelnen Streifen bekundet ist, praktisch ohne Bedenken vorgenommen werden können. Für die theoretische Untersuchung hat diese Zerlegung den Vortheil, daß dadurch die möglicher Weise eintretende ungünstigste Beanspruchung der Stirnmauer, bezw. Widerlagsmauer in Betracht gezogen wird.

Würden z. B. die Streifen *II* oder *II*₁ bis zur Stirnmauer *ab* erweitert gedacht, so enthält diese Zone einen Theil *II* oder *II*₁ als Haupttheil und den punktirten Theil als Nebentheil. Die gefamte Zone bildet alsdann ein einhäufiges Gewölbe, dessen Stabilität im Plane *II* untersucht ist. Hiernach wird der in *x* angreifende Kämpferdruck für die Stirnmauer *ab* als $o i_1$ und der in *h* wirkfame Kämpferdruck für die Widerlagsmauer *ac* als $i_1 b$ gefunden. Dieselben schliessen mit den Normalen der zugehörigen Kämpferfugen einen Winkel ein, welcher hier weit kleiner bleibt, als der Reibungswinkel des Materials, so daß eine Gefahr des Abgleitens des Wölbstreifens, d. h. wie ausdrücklich bemerkt werden soll, nach dem Innenraume des Gewölbes zu, nicht vorhanden ist.

Zerlegt man die Kämpferdrücke in ihre wagrechten und lothrechten Seitenkräfte, so kommen für die vorliegende Untersuchung die wagrechten Seitenkräfte $o k_1$, bezw. $i_1 b$ hauptsächlich in Betracht. Beide sind von gleicher Größe; sie messen 1,2 m. Bei einer Zonentiefe von 1 m und bei der zu Grunde gelegten Basis $oz = 2$ m entsprechen dieselben einer Kraft von $1,2 \cdot 2 \cdot 1600 = 3840$ kg und somit für den Streifen von $\frac{1}{2}$ Stein = 0,065 m einer Kraft von $0,065 \cdot 3840 = 249,6$ kg = H_0 .

Diese Kraft H_0 läßt sich am Widerlager *ac* zerlegen in eine Kraft

$$N = H_0 \cdot \cos \varphi,$$

welche senkrecht auf *ac* wirkt, und in eine Seitenkraft

$$T = H_0 \cdot \sin \varphi,$$

welche in der Richtung von *ac* fällt.

Die entsprechend vorgenommene Zerlegung von *H* an der Stirnmauer *ab* ergibt

$$N_0 = H_0 \cdot \sin \varphi \quad \text{und} \quad T_0 = H_0 \cdot \cos \varphi.$$

Da hier der Winkel $\varphi = 45$ Grad genommen war, so wird, weil $\sin 45^\circ = \cos 45^\circ$ ist, auch $N = T = N_0 = T_0$, und zwar $= H_0 \cdot 0,7071 = 249,6 \cdot 0,7071 = \infty 176,5$ kg.

Hierbei ist nun noch zu bemerken, daß die Kräfte *T* und *T*₀ das Bestreben haben, den Gewölbstreifen längs der Widerlagsfläche zum Gleiten zu bringen. Um dieses Gleiten bei dem noch nicht vollendeten Gewölbe zu verhindern, könnten die Widerlagsflächen für jede Zone rechtwinkelig zur Zonenebene, also in der Gefammtheit sägeförmig ausgeführt werden. Eine solche Anordnung unterbleibt meistens, und es ist alsdann beim Einwölben ein gut und schnell bindender Mörtel zu verwenden. Ist das Gewölbe in allen Schichten am Widerlager angefetzt, so halten sich die in der Richtung von *a* nach *E* und die in entgegengesetzter Richtung von *b* nach *E* beim Schwalbenschwanz-Verband entstehenden Kräfte *T* das Gleichgewicht.

Bei der Berücksichtigung der Pressbarkeit des Wölbmaterials sind, wie früher in Art. 141 (S. 194) schon erwähnt, z. B. für den Streifen *II* die Punkte *x*, *y* und *h* mehr in das Innere der Stirnfläche zu verlegen. Hierdurch entsteht jedoch ein größerer Gewölbschub, welcher nach den gemachten Angaben leicht bestimmt werden kann.

Wäre der Gewölbkörper in den Ecken von *a* und *b*, bezw. von *c* und *d* aus nur bis zu den von der Mitte *e* der Stirnmauer *ab* abzweigenden Streifen *I* und *I*₁ ausgeführt und dann nach beseitigter Unterrüstung sich selbst überlassen, so würde ein Einzelfstreifen von der Beschaffenheit der Wölbchicht *IV* nach der Untersuchung im Plane *IV* nur einen wagrechten Schub $ou = 0,4 \cdot 2 \cdot 1600 \cdot 0,065$ kg = 83,2 kg liefern. Die Seitenkräfte $W_1 = 83,2 \cdot \cos \varphi$ und $W = 83,2 \cdot \sin \varphi$, d. h. hier $W_1 = W = 83,2 \cdot 0,7071$ kg = $\infty 59$ kg würden in folchem Falle, bei dem die Eckstücke des Gewölbkörpers durch das ganze übrige Gewölbe noch nicht in Mitleidenschaft gekommen sind, für die Widerlagsmauer, bezw. Stirnmauer in Rechnung zu ziehen sein. Sobald aber die Gewölbstreifen in der Richtung von *e* nach *f* zu weiter aus-

geführt werden, und namentlich nach Vollendung des Gewölbes wird der ganze Gewölbkörper diese Eckstücke in Anspruch nehmen und beeinflussen.

Denn denkt man sich, daß beim geschlossenen Gewölbe die Stirnmauer mit dem bis A reichenden Gewölbkörper seitlich nur wenig ausweichen würde, so daß bei A eine Lücke entstände, so würde der Gewölbschub des Streifens bei A sich in seiner Kräfteebene fortzupflanzen streben, d. h. in der Fortsetzung der Richtungsebene der angenommenen und bei der Wölbung innegehaltenen Zonenlage. Hierdurch wird es erklärlich, daß, wie die Erfahrung in der Praxis lehrt, kein übermäßig großer Gewölbschub auch bei erheblich langen Kappengewölben mit Schwalbenschwanz-Verband auf die Stirnmauer gelangt. Der Streifen II liefert innerhalb der Strecke eb der Stirnmauer die Kräfte N_0 , bezw. T_0 . Der zugehörige Streifen II_1 , gehörig erweitert genommen, würde bei dem in Rede stehenden Verbands, entsprechend einer Zonentheilung des Gewölbes parallel zu II_1 , für die Stirnmauer innerhalb der Strecke ea dieselben Kräfte N_0 und T_0 ergeben. Gefällt sich an diesen Stellen noch der Schub W eines antretenden Streifens, z. B. IV , hinzu, so ist die ungünstigste Beanspruchung für die Stirnmauer in eine gewisse Grenze gebracht. Der Rechnung nach wäre alsdann für diese Stelle der ungünstigste Schub gleich

$$N_0 + W = 176,5 + 59 = 235,5 \text{ kg.}$$

In der Mitte e der Stirnmauer wirkt als ungünstigster rechtwinkliger Schub die auf S. 279 ermittelte Kraft $U = 226,24 \text{ kg}$. Setzt man in der angegebenen Weise, der Zonentheilung gemäß, die Untersuchung der einzelnen Wölbstreifen fort, so gelangt man in bE zu einem Wölbstreifen von größter Spannweite. Derselbe tritt nun aber als symmetrisch geformtes und symmetrisch belastetes kleines Gewölbe mit elliptischer Wöblinie auf. Die statische Untersuchung dieses Streifens ist im Plane V vorgenommen. Man erhält hiernach den möglichst kleinsten, jetzt wagrecht gerichteten Gewölbschub $oE = H_{II}$ zu

$$1,55 \cdot 2 \cdot 1600 \cdot 0,065 \text{ kg} = 322,4 \text{ kg.}$$

Die senkrecht zur Widerlagsmauer ac , bezw. bd gerichtete Seitenkraft derselben ist $N_{II} = T_{II}$, $= 322,4 \cdot \cos \varphi = 322,4 \cdot 0,7071 = \infty 228 \text{ kg}$, und ihre rechtwinklig zur Stirnmauer gerichtete Seitenkraft ist $N_{II} = 322,4 \cdot \sin \varphi = 322,4 \cdot 0,7071 = \infty 228 \text{ kg}$, deren Größe hier auch für die in ac fallende Seitenkraft $T_{II} = 322,4 \cdot \sin \varphi = \infty 228 \text{ kg}$ maßgebend wird.

Für alle bis zu dem durch c parallel mit bE geführten Streifen bleibt beim ganz geschlossenen Gewölbe derselbe Gewölbschub H_{II} , während von hier ab für die Stirnmauer cd dieselbe Untersuchung wieder eintritt, welche für die Stirnmauer ab vorgenommen wurde. Sollte in der Nähe des Scheitels γ eine Öffnung verbleiben, so ist anzunehmen, daß die Streifen, welche diese Öffnung begrenzen und sich wiederum gegen die vorhandenen Gewölbstücke legen, ihren Gewölbschub durch dieselben auf die Widerlager übertragen. Da für diese Grenzstreifen, wenn sich dieselben nicht etwa, wie bei ganz kurzen Gewölben der Fall sein würde, gegen die Stirnmauern mit legen, derselbe Gewölbschub wie für einen ganzen Zonenstreifen bE auftritt, so erleidet die Bestimmung der Widerlagsstärke für ac , bezw. umgekehrt für bd auch bei einer solchen Öffnung im Allgemeinen keine wesentliche Aenderung; denn würde hinter jeder Ecke eines solchen Streifens eine Lücke sein, so würde der Gewölbschub das Bestreben haben, sich in seiner Kräfteebene fortzusetzen, bis der widerstehende Mauerkörper ac , bezw. bd getroffen wird. Dies gilt für die in der Richtung bE genommenen Zonen eben so gut, wie für die in einer Richtung aE gewählten Zonen.

Wollte man aber auch die kleinen Grenzstreifen der Öffnung, der Weite dieser Öffnung entsprechend, als kleine einhöftige Gewölbe behandeln, so würde die wagrechte Seitenkraft des Gewölbschubes derselben weit kleiner ausfallen, als die wagrechte Seitenkraft des Gewölbschubes eines Zonenstreifens von der Eigenschaft des Streifens bE , bezw. aE , so daß die für letzteren Streifen erforderliche Widerlagsstärke vollauf auch für jene einhöftigen Öffnungstreifen und deren Nachbarstreifen genügt.

Für einen Hauptstreifen bE ist noch derjenige wagrechte Gewölbschub $E_1o = H_{III}$ im Plane V ermittelt, welcher einer Mittellinie des Druckes angehört, die durch die Mittelpunkte der angenommenen Scheitelfuge und der Kämpferfuge geht.

Es ist selbstredend, daß für die sichere Standfähigkeit der Widerlagsmauern dieser größere Gewölbschub, wie in Art. 142 (S. 197) für das Tonnengewölbe angegeben, Berücksichtigung finden soll.

Vergleicht man die gewonnenen Ergebnisse der Rechnung, so zeigt sich, daß die auf die Stirnmauer kommenden wagrechten und rechtwinklig dazu gerichteten Gewölbschübe $U, N_0 + W$ und N_{II} nur ganz wenig von einander abweichen und daß die Größe derselben auch mit den auf die Widerlagsmauer gelangenden rechtwinklig und wagrecht gerichteten Schüben N_{II} der Wölbstreifen bei der Zonentheilung oder Schichtenlage unter einem Winkel $\varphi = 45$ Grad in guter Uebereinstimmung steht. Hierdurch ergibt sich auch eine Bestätigung der in der Praxis bekannten und befolgten Regel, wonach bei der An-

wendung des Schwalbenschwanz-Verbandes bei Kappengewölben unter Verwendung eines Richtungswinkels $\varphi = 45$ Grad im Allgemeinen die Stärke der Stirnmauern gleich der Stärke der Widerlagsmauern anzuordnen ist.

Soll die Scheitellinie des Kappengewölbes mit dem bezeichneten Verbands nicht wagrecht, sondern unter Hebung des Mittelpunktes, der Scheitellinie als gebrochene gerade Linie mit Stich oder als flach gekrümmte Linie (Kreisbogen mit grossem Halbmesser) genommen werden, so wird am Grundzuge der Stabilitätsuntersuchung nichts geändert.

Wohl aber ergeben sich bei einer derartigen Anordnung einige Vortheile in Bezug auf die Abnahme der Grösse der Gewölbschübe. Durch das Höherlegen der Scheitellinie bis zum Mittelpunkte derselben erhalten die einzelnen Wölbstreifen nach und nach eine grössere Pfeilhöhe, und da die Gewichte der Streifen sich in nennenswerther Weise nicht ändern, so wird der Wölbschub im Grossen und Ganzen kleiner, als bei wagrechter Lage der Scheitellinie. Dadurch wird im Allgemeinen eine geringere Stärke der Widerlagsmauern, bezw. der Stirnmauern des Gewölbes bedingt.

Sind die parallelen Seitenebenen der Wölbstreifen nicht lothrecht, sondern geneigt, so tritt die im Vorhergegangenen erörterte Beeinflussung der Gewölbstücke an den Ecken des Raumes erst recht ein, ohne aber, da diese Neigung aus praktischen Gründen immer nur äusserst geringfügig genommen werden kann, die früher ermittelte Grösse der einzelnen Gewölbschübe wesentlich zu beeinträchtigen. Denn

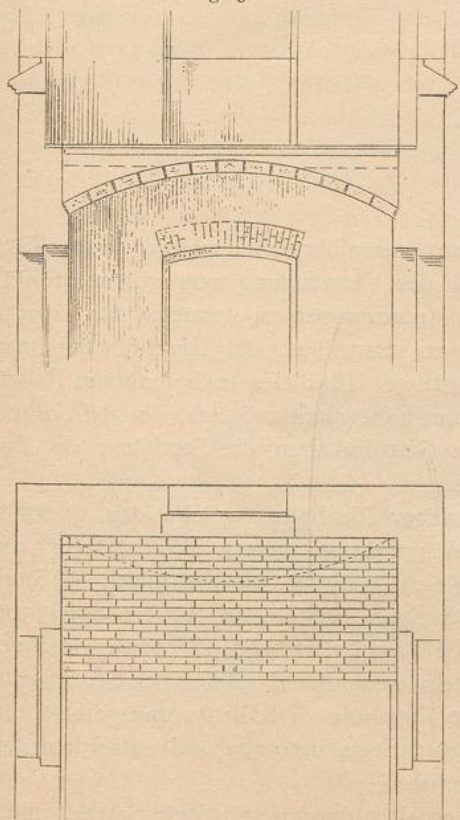
bei der Bestimmung derselben ist, wie aus dem Plane II von Fig. 366 im Besonderen schon hervorgeht, bereits durch Anordnung geneigter Fugenrichtungen die Bestimmung der Mittellinie des Druckes und des dazu gehörigen Gewölbschubes berücksichtigt.

Müssen bei diesen Gewölben Verankerungen der Widerlager eintreten, so gilt hierfür dasselbe wie bei den auf Kuf eingewölbten Kappen.

Die Stirnmauern sollen niemals so schwach hergerichtet werden, dass dieselben einer Verankerung bedürfen. Würden dieselben unter besonderen Umständen eine nicht ausreichende Stärke erhalten müssen, so ist von der Einwölbung der Kappen auf Schwalbenschwanz-Verband Abstand zu nehmen.

Beim sog. *Moller'schen* Verbands (Fig. 368) liegen sämtliche Wölbzonen parallel mit der Stirnmauer. Die einzelnen Backsteine sind auf die hohe Kante gestellt, so dass die Dicke derselben parallel zur Gewölbaxe ist. Jede Gewölbzone bildet ein kleines Kappengewölbe für sich, welches

Fig. 368.



182.
Kappengewölbe
mit
Stich.

183.
Kappengewölbe
mit
Moller'schem
Verband.

feine Stütze an den eigentlichen Widerlagsmauern findet. Die Stabilitätsuntersuchung dieser Wölbzonen erfolgt in gleicher Weise, wie bei den auf Kuf eingewölbten Kappen.

184.
Kappengewölbe
mit
zunehmender
Wölbstärke.

Soll ein Kappengewölbe nach dem Widerlager zu eine größere Stärke als im Scheitel erhalten, so muß, wie schon in Art. 124 (S. 147) bemerkt ist, die Zunahme folcher Stärke stetig eintreten, wie in Fig. 370, und nicht, wie in Fig. 369, im plötzlich gebildeten Ansätze *b* erfolgen. Wie die statische Untersuchung (Fig. 371) zeigt, wird bei dieser Anordnung für den schwächeren Theil in der Mitte des Gewölbes ein ungünstiger Verlauf der Drucklinie herbeigeführt. Bei *k* zeigt sich eine Bruchfuge; der mittlere Theil senkt sich dann leicht und nimmt eine neue Lage *aik* an, womit eine Ausbauchung des Gewölbes in der Nähe von *fg*, bzw. *k* verknüpft ist.

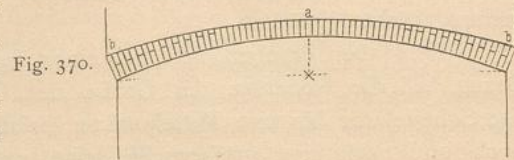
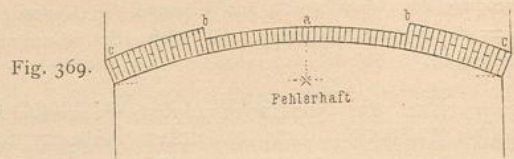
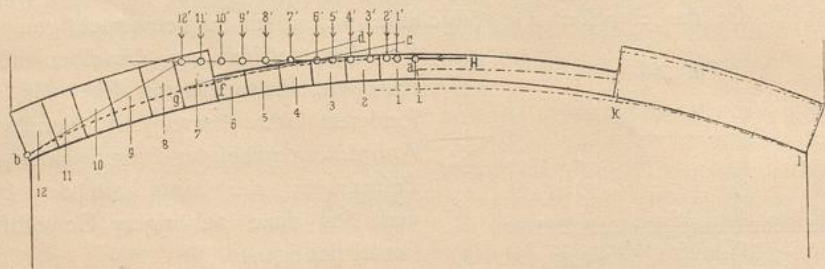


Fig. 371.



Diese Erscheinungen sind thatfächlich bei derart ausgeführten Gewölben beobachtet, die zum Theile nach ihrer Ausrüstung, trotz der Verwendung von gutem Mörtel, eingestürzt sind. Es ist geboten, vor solchen Anordnungen zu warnen. Am zweckmäßigsten ist, um ein Verhauen der Steine zu vermeiden, das Durchführen einer gleichen Stärke vom Scheitel bis zur Widerlagsfuge. Ist dieses in besonderen Fällen bei einer im Scheitel beschränkten Constructionshöhe nicht möglich, so muß durch entsprechendes Verhauen der Wölbsteine am Gewölbrücken die Stetigkeit der Zunahme der Gewölbstärke herbeigeführt werden.

185.
Empirische
Regeln
für die
Wölb- und
Widerlags-
stärke.

Bei Kappengewölben, mit nicht zu geringer Pfeilhöhe, welche den gewöhnlichen mittleren Belastungen ausgesetzt sind, wird bei gutem Wölbmaterial die Gewölbstärke für Spannweiten bis zu 2,5 m gleich $\frac{1}{2}$ Stein, bis 3 m gleich $\frac{1}{2}$ Stein und behaftet mit 1 Stein starken, 1 bis $1\frac{1}{2}$ Stein breiten, in Entfernungen von 1,5 bis 2,5 m angebrachten Verstärkungsgurten (vergl. Art. 162, S. 212), oder bei größeren Belastungen durchweg gleich 1 Stein genommen. Bei einer Spannweite von 4 m kann die Gewölbstärke, eine stetige Zunahme derselben vorausgesetzt, im Scheitel gleich $\frac{1}{2}$ Stein, am Widerlager gleich 1 Stein betragen und außerdem das Gewölbe mit Verstärkungsgurten versehen werden.

Kappengewölbe bis zu 5 m Spannweite erhalten durchweg 1 Stein Stärke, unter

Umständen, namentlich bei sehr langen Gewölbzügen, Verstärkungsurte oder auch 1 Stein Stärke im Scheitel und $1\frac{1}{2}$ Stein am Widerlager in stetiger Zunahme.

Sind die Widerlager der Kappengewölbe nicht besonders zu verankern, ist ihre Höhe nicht erheblich über der Rückenlinie des Gewölbes abgegrenzt, so nimmt man die Stärke derselben zu $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{5}$ der Spannweite an.

c) Ausführung der Kappengewölbe.

Als Wölbmaterial für Kappengewölbe wird hauptsächlich Backstein benutzt. Nur in Gegenden, in welchen dünne, lagerhafte und gute Bruchsteine billiger beschafft werden können, werden diese in Verwendung genommen. Außerdem werden hier und dort statt der Backsteine auch andere künstliche Bausteine, deren Gestalt im Allgemeinen derjenigen der Backsteine entspricht, mit Vortheil als Wölbsteine gebraucht.

186.
Allgemeines.

Soll das Gewicht der Kappengewölbe möglichst gering werden, so verwendet man in besonderen Fällen Hohlziegel oder Lochsteine, unter Umständen auch die porösen Steine, Schwemmsteine u. dergl. Diese Materialien müssen aber stets eine genügende Festigkeit gegen Druck besitzen.

In architektonischer Beziehung erscheint das Kappengewölbe mehr als eigentliche Nützlichkeits-Construction, so daß dasselbe im Vergleich mit den übrigen Gewölbformen, welche einer weiteren künstlerischen Durchbildung fähig sind, in den Hintergrund tritt. Das Kappengewölbe nähert sich mehr einer flachen, wagrechten Decke von märsiger Breitenabmessung, tritt dem entsprechend in die Erscheinung und erhält danach eine ähnliche Behandlung.

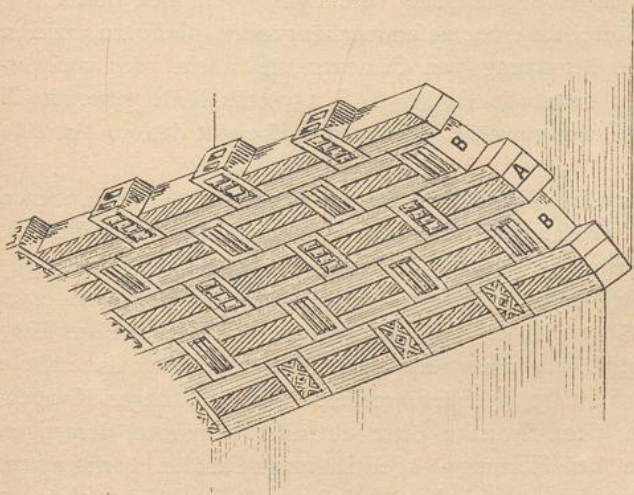
Je nach dem Verbands, welcher bei der Mauerung der Kappengewölbe in Anwendung gebracht wird, unterscheidet man

- 1) Kappengewölbe auf Kuf,
- 2) Kappengewölbe mit Schwalbenschwanz-Verband und
- 3) Kappengewölbe mit *Moller'schem* Verband.

187.
Mauerung
der Kappen-
gewölbe.

Bei den Kappengewölben auf Kuf gemauert gelten genau dieselben Regeln,

Fig. 372.



welche bezüglich der Mauerung der Tonnengewölbe in Art. 149 (S. 218) mitgeteilt sind. Hier möge noch bemerkt werden, daß die Ausführung von gewöhnlichen Kappengewölben in zwei oder mehr flach über einander liegenden Ringschichten weniger gebräuchlich ist.

Soll bei Kappengewölben die Laibungsfläche frei, ohne Putz, in farbigem und noch besonders geschmücktem