



**Lehrbuch der gotischen Konstruktionen**

**Ungewitter, Georg Gottlob**

**Leipzig, 1890-**

Kappenform und Wölldruck

---

[urn:nbn:de:hbz:466:1-80225](https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:466:1-80225)

als auskömmlich anzusehen, während für Gewölbe von 10 bis 14 m eine durch besondere Ziegel erreichbare Kappenstärke von  $\frac{3}{4}$  Stein oder 18 cm als angemessen betrachtet wird. Andrerseits kann man kleine stark busige unbelastete Kappen noch weit dünner ausführen, mit 10 cm oder selbst  $\frac{1}{4}$  Stein Dicke. Vorausgesetzt, dass Kappen und Rippen statisch richtig in der Weise gebildet sind, dass die Kappen nur sich selbst haltende Füllflächen, die Rippen aber die eigentlichen Kraftträger sind, so würde nichts im Wege stehen, engmaschige Rippengewölbe von beliebiger Weite mit  $\frac{1}{4}$  Stein starken Kappen zu schliessen. Eine Grenze der Spannweite würde durch die Haltbarkeit der Rippen, nicht diejenige der Kappen vorgezeichnet sein.

#### Kappenform und Wölbdruck.

Es ist schon weiter oben (Seite 47) ausgeführt, dass die Uebertragung des Wölbdruckes in den Kappen, abgesehen von Zufälligkeiten, sich nach der allgemeinen Kappenform, weniger nach den Kappenschichten richtet. Es konnte daher eine allgemeine Betrachtung über die zweckmässige Wölbform angestellt werden, ohne Rücksicht auf die Ausführung, die dabei gewonnenen Resultate gelten im gewissen Sinne selbst für Gussgewölbe aus zugfestem Mörtel.

Die viel verbreiteten Annahmen, dass Gussgewölbe jede beliebige Gestalt annehmen könnten und dass von ihnen kein Widerlagsdruck ausgeübt würde, sind nur bedingungsweise zutreffend. Wenn das Gusswerk starke Zugkräfte völlig zuverlässig aufnehmen kann, aber auch nur in diesem Falle, dann gestattet es allerdings eine gewisse willkürliche Entfernung von der günstigsten Drucklinie. Je erheblicher aber die Abweichung wird, um so grösser werden auch die Zugkräfte, um so ausgedehnter muss aber auch der widerstehende Querschnitt werden, d. h. starke Abweichungen von der Drucklinie erfordern grössere Wölbstärke. Den geringsten Materialverbrauch wird ein Gussgewölbe stets aufzuweisen haben, wenn es der Form der Stützlinie folgt. Ausserdem wird es dann durch zufällige Beeinträchtigung der Zugfestigkeit, als durch Temperaturrisse, Setzungen nicht im Bestande gefährdet.

Sehr bedenklich ist die Voraussetzung, dass Gussgewölbe keinen Schub liefern. Natürlich lassen sich gerade oder wölbartig gebogene Platten aus Gussmasse bilden und einem Balken gleich auflagern; sie sind zwar weniger zuverlässig als eine Steinplatte, können aber immerhin bei guter Ausführung als Ersatz dienen. Solche Platten sind dann aber auf Biegung als Balken zu berechnen, wobei sich eine entsprechend grössere Dicke ergibt, ganz besonders bei starker Belastung.

Man verwechselt gar zu gern Balken und Gewölbe. Der Balken (ebenso die gebogene Platte) ist an den Enden nicht verspannt, liefert keinen Seitenschub und wird auf Biegung (Druck und „Zug“) beansprucht. Das Gewölbe hat eingespannte Enden, liefert Seitenschub, wird dafür aber nicht auf Biegung, sondern auf Druck beansprucht und kann bedeutend dünner sein.

Würde man eine gebogene Platte genügender Stärke einer grossen Schale gleich fertigstellen und nachher behutsam auf die Widerlager setzen, so wäre kein Schub zu erwarten, sonst aber kommen schon, so lange der Mörtel noch weich ist, trotz der Lehrgerüste grosse Seitenpressungen auf die Widerlager, im vollen Umfange aber tritt der Schub auf, wenn aus irgend einem Grunde die so leicht eintretenden Risse das Gewölbe teilen. Da das Gusswerk meist sehr massig ist, überdies ein grosses spezifisches Gewicht zu haben pflegt, so werden die auftretenden Schubkräfte sogar ganz besonders gross; nicht ohne Grund haben die praktischen Römer ihre schweren Wölbungen durch ganz gewaltige Widerlager gestützt. Besonders warnen dürfte man vor einer zu vertraulichen Verwendung weiter flacher Betondecken.

Bei den wenig elastischen Eigenschaften aller Stein- und Mörtelmaterialien ist es immer gewagt, mit ihrer ununterbrochenen Zugfestigkeit zu rechnen, will man sich

Gewölbe mit  
Zug-  
spannungen.

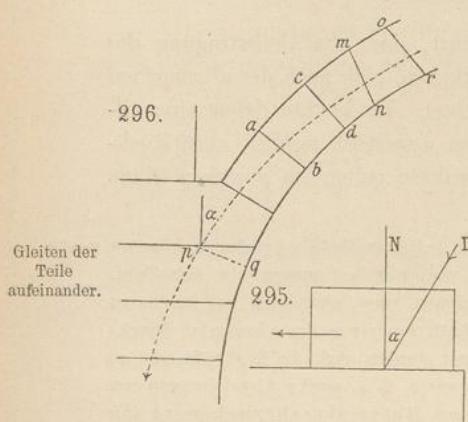
Gewölbe  
allein mit  
Druck-  
spannungen.

nicht verhängnisvollen Zufälligkeiten aussetzen, so verzichtet man ganz darauf, sie auf Zug zu beanspruchen. Letzterer Standpunkt soll auch hier gewahrt bleiben, es wird sodann die Forderung aufzustellen sein, dass die Druckkräfte stets eine gesicherte Lage im Innern der Kappe haben, dass an keiner Stelle die Beanspruchung auf Druck das zulässige Mass überschreitet und dass unter der Einwirkung des Druckes kein Gleiten der einzelnen Teile auf einander zu befürchten ist.

Ueber die günstigste Form der Kappen nach Massgabe der Druckkurven ist Seite 52 und folgende ausführlich gehandelt, bezüglich der Druckbeanspruchung kann noch nachgefügt werden, dass in den meisten Fällen der in unbelasteten Kappen auftretende Druck bei richtiger Form der Kappen weit unter der zulässigen Grenze bleibt. Als letztere kann man etwa annehmen für gewöhnliche gut gebrannte Ziegel-

steine in Kalkmörtel 7 kg auf 1 qcm, für poröse Steine 3—5 kg, für die rheinischen Schwemmsteine 2—3 kg. Harten Ziegelsteinen oder Klinkern in Zementmörtel kann man 11 oder auch wohl 14 kg Druck auf 1 qcm zumuten, natürlichen Steinen je nach ihrer Härte und dem verwandten Mörtel 7—20 kg und mehr.

Das Gleiten der Steine bedarf noch einer Erörterung. Wenn ein Stein auf seine Unterlage einen schräg gerichteten Druck  $D$  (Fig. 295) ausübt, so wird er unter Umständen auf dieser Unterlage fortgleiten und zwar um so leichter, je schräger der Druck wirkt, oder mit andern Worten je grösser



der Winkel  $\alpha$  zwischen Druckrichtung und dem auf die Unterfläche gefällten Lot  $N$  ist. Den Winkel  $\alpha$  nennt man den Reibungswinkel, er ist sehr verschieden nach der Oberflächenbeschaffenheit der sich berührenden Körper. Während zwei polierte Steine vielleicht schon bei einem Neigungswinkel unter  $10^\circ$  zum Gleiten gebracht werden, kann der Druck zweier rauher Steine einen Winkel von  $60—80^\circ$  zu der Senkrechten einnehmen, bevor ein Verschieben eintritt. Für die Gewölbe kommt selten ein Gleiten von Stein auf Stein in Frage, vielmehr handelt es sich hier um die Reibung zwischen Mörtel und Stein oder wohl ebenso häufig um die Verschiebung der Mörtelteile gegen einander. Neben der rauen Oberfläche der Steine kommt es also ganz besonders auf die Beschaffenheit des Mörtels an, dessen Reibungswiderstand sich nach der Art seiner Bestandteile, seiner Mischung und Güte in den weitesten Grenzen bewegt. Nach stattgehabter Erhärtung wird bei mässig gutem Mörtel und mässig rauher Steinfläche der Reibungswinkel selten unter  $60$  oder  $70^\circ$  liegen, wogegen der noch weiche Mörtel die grössten Schwankungen zeigt, wenn er sehr dünnflüssig und beweglich ist, so kann schon bei weniger als  $20^\circ$  Neigung ein Gleiten eintreten, andererseits ermöglicht es ein guter steifer Kalkmörtel, einen Ziegelstein an eine senkrechte Wand zu kleben.

Bei freihändig eingewölbten Kappen, deren Herstellung an die Verwendung eines steifen Mörtels gebunden ist, kann man gewöhnlich mit einem Reibungswinkel von mindestens  $45^\circ$  rechnen. Andererseits sind Fälle vorgekommen, dass noch nicht geschlossene freihändige Kappen-

wölbungen durch ein dicht nach dem Mauern vorgenommenes Hintergiessen mit dünnem Zement zum Einsturz gebracht sind. Durch das Aufweichen der Mörtelfugen wird der Reibungswiderstand minimal geworden sein, eine statisch ungünstige Form der Kappen dürfte gleichzeitig vorgelegen haben.

Die Gefahr des Gleitens erfordert eine Beachtung der Fugenrichtung im Durchschnitt und im Grundriss. Stellt Fig. 296 den Schnitt durch eine Kappe oder irgend einen Bogen mit eingezeichneter Drucklinie dar, so darf zunächst der Winkel  $\alpha$  am Anfänger nicht grösser werden als der zulässige Reibungswinkel (weicher Mörtel vorausgesetzt). Sollte dieser Fall eintreten, so muss man die betreffende Fuge noch im vorderen Teil radial richten, wie es die punktierte Linie  $p\ q$  andeutet. Es dürfen ferner die Wölfungen  $a\ b$ ,  $c\ d$  usw. nicht unter zu flachem Winkel von der Drucklinie getroffen werden. Diese Möglichkeit ist bei radialer Lage der Fugen in den uns angehenden Gewölben kaum zu fürchten, nach Massgabe des Reibungswinkels würden sogar Fugen zulässig sein, die nach oben etwas konvergieren wie  $m\ n$  und  $o\ r$ . Natürlich wird man derartige Unregelmässigkeiten meiden, da der betreffende Stein durch Zufall ohne Spannung und ohne Mörtelbindung sein und herabstürzen könnte.

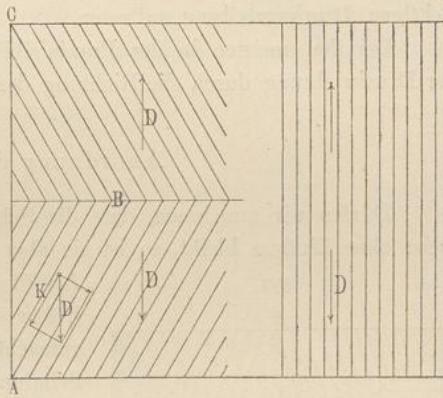
Die gleiche Beachtung verdient die Reibung der im Grundriss in Erscheinung tretenden Lagerfugen zwischen den einzelnen Gewölbschichten — die kurzen Stossfugen kommen weniger in Frage. Die Gefahr einer Verschiebung tritt am wenigsten ein, wenn die Schichten senkrecht zur Druckrichtung laufen, ihre Lage bleibt aber immer noch gesichert, wenn sie von dieser günstigsten Richtung um weniger als den Reibungswinkel abweichen.

Demnach wird der Wölbdruck nicht beeinflusst, so lange die Schichtenrichtung um weniger als den Reibungswinkel vom Lot zur Druckrichtung abweicht. (Das heisst mit anderen Worten, so lange der Winkel zwischen Druck- und Schichtenrichtung nicht flacher ist als 90 Grad weniger den Reibungswinkel.) In diesen Grenzen ist es ganz gleichgültig, wie auch immer die Schichten laufen mögen (vergl. darüber die Ausführungen S. 52 usw.).

Würde bei einer tonnenförmigen Kappe der Mörtel beim Mauern oder wenigstens beim Ausrüsten so steif sein, dass der Reibungswinkel  $45^\circ$  wäre, so dürfte demnach der Winkel zwischen den Schichten und der Wölbachse höchstens diesen Wert haben. Lage nun wie in Fig. 297 aber ein grösserer Winkel, z. B.  $60^\circ$  vor, so würde eine Bewegung der Schichten gegeneinander oder, so weit diese verhindert ist, wenigstens eine Druckänderung bezüglich der Widerlager eintreten. Der Teil  $A\ B\ C$  der Schichten würde z. B. die Stirnmauer belasten und zwar mit einer aus dem Druck  $D$  abgeleiteten Seitenkraft  $K$  vermindert um den Reibungswiderstand. Die Kraft würde allerdings nicht sehr gross ausfallen, der Hauptschub bliebe immer den eigentlichen Widerlagern. Wenn das Gewölbe noch weiter erhärtet wäre, derart dass der Reibungswinkel über  $60^\circ$  betrüge, so würden die Stirnmauern nun sogar sich durch Setzen oder Ausweichen entlasten können, worauf der ganze Schub wieder allein durch die unteren Widerlager aufgenommen werden müsste.

Lage der Fugen mit Rücksicht auf das Gleiten.

297.



Die Möglichkeit, dass die Schichtenlage eine abweichende Druckverteilung erzeugt, wird am leichtesten vorliegen, so lange der Mörtel noch weich ist, will man daher sicher gehen, dass die Druckübertragung wirklich nach der Wölbform vor sich geht, so ist es gut die Schichten von ihrer günstigsten Richtung senkrecht zum Druck nicht um mehr als  $45^\circ$  abweichen zu lassen (bei der Forderung grösster Sicherheit event. auch nur  $30^\circ$ ). Bei kuppelartigen Wölbungen, welche Druck in der Meridian- und der Ringrichtung bekommen, ist die Schichtenrichtung noch viel weniger, meist gar nicht beschränkt.

Eine Schichtenlage bedarf noch besonderer Erwähnung, es ist das die bei den Byzantinern, aber auch im weiteren Mittelalter geübte, neuerdings wieder durch MOLLER zu Ehren gebrachte Lage senkrecht zum Scheitel (Fig. 297 rechts). Sie erleichtert ganz besonders das freihändige Mauern. Bei ihr fällt die Richtung von Schicht und Druck zusammen, es überträgt jede Schicht ihren Druckanteil für sich auf das Widerlager, hier kann natürlich auch keine Abweichung von der richtigen Druckverteilung auftreten.

Bei den meisten in der Praxis üblichen Schichtenlagen ist eine Beeinflussung der Druckrichtung durch die Richtung der Schichten nicht vorauszusetzen.

#### Anordnung der Schichten.

Schichten-  
lage bei den  
Alten.

Dürfen wir annehmen, dass die Schichtenanordnung für die Druckübertragung meist ohne Einfluss bleibt, so ist sie aber desto wichtiger für die Bequemlichkeit der

Ausführung. Es sind daher in dieser Richtung in früher und neuerer Zeit mannigfache Versuche gemacht. Sofern die Alten ihre Gewölbe auf voller Schalung herstellten, war für sie die Schichtenlage von geringerem Wert, wölbte man aber freihändig, so gelangte sie sofort zu besonderer Bedeutung.

Gewöhnlich bildeten die Fugen bei den Tonnen gewölben sowohl wie bei den aus Tonnen zusammengesetzten Kreuzgewölben gerade Linien, die bei den frühromanischen Gewölben einsteils „wagrecht“, andrenteils „gleichlaufend mit der Tonnenrichtung“ waren. (Kappe I in Fig. 298.) Als man zu überhöhten Wölbungen überging, konnten

die Fugen nicht mehr beide Eigenschaften zugleich haben. Blieben sie gleichlaufend mit der Tonnenachse, so stiegen sie nach der Mitte zu an; blieben sie dagegen wagrecht, so nahmen sie eine andere Richtung im Grundriss ein. (II in Fig. 298). Die erste Art, also die gleiche Richtung mit der Kappenachse wurde in Deutschland und im östlichen Frankreich gepflegt, während man in dem derzeit englischen Westfrankreich — jedenfalls im Anschluss an die dort üblichen in horizontalen Ringen gewölbten Kuppelgewölbe — den zweiten Weg einschlug. Denselben verfolgt man auch in der Normandie und in England, er führt hier zu der Aufnahme der Scheitelrippe und bildet die Grundlage für die bei den späteren Netz- und Fächergewölben

