



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Lehrbuch der gotischen Konstruktionen

Ungewitter, Georg Gottlob

Leipzig, 1890-

Winddruck gegen die Wände der Basilika

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

und ist daher für grosse steile Dächer bei der Bestimmung der Strebepfeiler bez. Wandstärke mit in Rücksicht zu ziehen, was keine Schwierigkeit bietet.

Wenn die Mittelpfeiler einer Hallenkirche oder zweischiffigen Kirche die Dachlast nicht mittragen, so werden sie auch vom Windschub nicht wesentlich berührt. Ruhet aber ein Teil des Daches auf dem Mittelpfeiler, so hängt es ganz von der Art der Konstruktion ab, wie stark dieser an der Aufnahme von Wind und Dachlast teilnimmt. Zeigt sich bei den statischen Untersuchungen (nach Massgabe der früheren Beispiele S. 154 und S. 157), dass der Mittelpfeiler dem bald von rechts, bald von links kommenden Windschub ohne unerwünschte Stärkezunahme nicht Stand halten kann, so ist es sehr empfehlenswert, oben in der Querrichtung über den Gurten von der einen zur anderen Aussenwand eine Versteifung aufzumauern, welche den Windschub auf die Aussenwände übertragen kann.

Druck des Windes gegen die Wände der Basilika.

Sehr gewaltig gestaltet sich der Winddruck gegen hoch hinauftragende Wandflächen, bei einschiffigen oder Hallenkirchen pflegen die Aussenwände nebst ihren Strebepfeilern so stark zu sein, dass die vom Winde getroffene Seite den Druck in sich selbst aufnehmen kann. Nur bei sehr grosser Höhenentwicklung wird man darauf Bedacht zu nehmen haben, dass sich der Winddruck über dem Gewölbe zum Teil auf die andere Aussenwand übertragen und dem Wölbschub zugesellen kann.

Bei den Mittelwänden der Basilika aber, die auf möglichst dünne Pfeiler zu stützen sind, gehört die Bewältigung des Winddruckes zu den wesentlichsten Fragen, sie kann, wie wir nachweisen wollen, selbst wichtiger werden als diejenige des Wölbschubes, es ist auffallend, dass man die Bedeutung des Strebesystemes für die Windbewegungen bisher so wenig beachtet hat.

Die Mittelwand der grossen Kathedralen ragt 15 bis 20 m und mehr über das Seitenschiff hinaus. Bei 7 m Jochbreite und 20 m freier Höhe würde sie z. B. dem Winde 140 qm Fläche in jedem Felde bieten, welche $140 \cdot 120 = \text{rd } 17\,000 \text{ kgr}$ Druck erhalten würde, abgesehen von dem Windschube des Seitendaches, der vielleicht auch noch 2000 kgr auf die Mittelwand abgibt und dem Schube des Mitteldaches, der bei 5000 bis 8000 kgr Grösse einen mehr oder weniger grossen Anteil auf die getroffene Wand leitet. Es wird daher jedes Jochfeld einer derartigen Basilika 20 000 bis 25 000 kgr Windschub erhalten, beim Dom zu Köln rechnet sich sogar noch ein grösserer Wert heraus. Nun wird aber ein Mittelschiffgewölbe von 70 bis 100 qm Grundfläche (7 m Jochlänge und 10 bis 14 m Spannweite) bei Kappen, die ein Stein stark aus Ziegel oder in gleicher Schwere aus natürlichen Steinen gewölbt sind nach Tabelle 1 (S. 135) nur einen Schub von 15 000 bis 22 000 kgr auf jede Wand ausüben. Das Gewölbe muss demnach schon recht schwer sein, wenn es einen Schub liefern soll, der dem grössten zu erwartenden Windschub gleichkommt.

Zur Bewältigung des Windschubes sind zwei Möglichkeiten, entweder reicht die Stabilität der getroffenen Mittelwand bez. deren Pfeiler aus, den Schub aufzunehmen, oder es muss der Windschub ganz oder teilweise in oder über dem Gewölbe auf die andere Wand und deren Strebesystem übertragen werden.

Der erste Fall, die Aufnahme des Windes durch die getroffene Wand selbst,

Winddruck
und
Wölbschub.

Winddruck wird bei Basiliken ohne Strebebögen statthaben müssen, da eine Ueberleitung auf die andere Mauer hier den Wölbschub mehren würde, dessen Bekämpfung ohne- dies bei unverstrebten Basiliken schon grosse Schwierigkeiten macht. Die abgewandte Mauer wird schon genügend mehr beansprucht, wenn sie den ihr zufallenden Teil vom Windschube des Daches sicher aufnehmen soll.

Winddruck
bei der Basi-
lika ohne
Strebebögen:

Trägt bei einer mittelgrossen nicht verstrebten Basilika jeder Mittelpfeiler 300 000 kgr senkrechte Last und berechnet sich der ganze Winddruck gegen die Mittelwand nebst Dach auf 10 000 kgr mit einer durchschnittlichen Angriffshöhe von 16 m über Pfeilerbasis, so würde dieser Winddruck die Lage der Stützlinie unten im Pfeiler merklich nach innen rücken und zwar um ein Stück x , das sich sehr einfach berechnet aus der Momentengleichung:

$$300\,000 \cdot x = 10\,000 \cdot 16,00, \text{ also } x = 0,53 \text{ m.}$$

Es würde demnach durch den Wind ein Hin- und Herschwanke des Druckes unten um 53 cm zu erwarten sein. Sollen sich diese Schwankungen gerade innerhalb der Kerngrenze bewegen, so muss der Pfeiler für gewöhnlich, d. h. ohne Wind, den Druck in der Aussenkante des Kernes aufnehmen und eine Stärke haben, die bei rechteckigem Grundriss $3 \cdot 0,53 = 1,59 \text{ m}$, bei rundem Grundriss $4 \cdot 0,53 = 2,12 \text{ m}$ beträgt.

Dabei würden die Kantenpressungen schon ziemlich bedeutend werden, so dass man bei weniger festem Material diese Stärken noch zu vergrössern hätte. (Ohne Winddruck würde bei Ausbalanzierung der Massen der Druck sich durch die Pfeilermitte leiten lassen und somit die Pressung in niederen Grenzen bleiben, also die Pfeilerstärke entsprechend kleiner ausführbar sein).

Man ersieht, dass bei mässig hohen Basiliken mit wenig hochgezogenem Mittelschiff allenfalls die Aufnahme des Windes durch die „getroffene“ Wand noch möglich ist; als man aber im XII. und XIII. Jahrhundert die Höhenverhältnisse bedeutend steigerte ohne die lastende Mauermasse zu vermehren, ja letztere noch thunlichst zu verringern suchte, da konnte die Mittelwand dieser Aufgabe nicht mehr genügen, es hätte sonst infolge der Windschwankungen eine riesenhafte Steigerung der unteren Pfeilerdicke erfolgen müssen, die man aber vor allem zu verringern suchte.

Würde z. B. eine Basilika mit einer Pfeilerbelastung von 300 000 kgr einen Windschub von 20 000 kgr erhalten, der bei der grossen Höhe im Durchschnitt 25 m über Fussboden zur Wirkung käme, so würde der Wind einen Ausschlag in der Drucklinie $x = 20\,000 \cdot 25,00 : 300\,000 = 1,67 \text{ m}$ geben. So dick pflegte man bei einer derartigen Basilika aber den ganzen Pfeiler nur zu machen. Aus diesem Beispiel, dem nur mittelschlanke Verhältnisse zu Grunde liegen, geht hervor, dass der Mittelpfeiler einer hohen Basilika nur einen sehr geringen Teil des Winddruckes übernehmen kann, dass der überwiegende Teil in oder über dem Gewölbe auf die andere Seite zu lenken ist und hier in geeigneter Weise abgefangen werden muss. Da hier die Wand aber noch viel weniger solche Schwankungen in sich aufnehmen kann, wird das Vorlegen der Strebebögen eine Notwendigkeit. Es möge hier die Behauptung aufgestellt sein, dass die Einführung der Strebebögen mindestens ebenso sehr durch den Windschub, wie durch den Wölbschub veranlasst ist. Erst unter diesem Gesichtspunkte versteht man die Konstruktionen der Alten voll und ganz, erst unter ihm erkennt man z. B. den Zweck doppelt übereinander gesetzter Strebebögen, von denen der obere häufig viel höher angreift, als es der Wölbschub verlangt.

Winddruck
bei der Basi-
lika mit
Strebebögen:

Um den Einfluss des Windes zu veranschaulichen, ist in Fig. 411, (Querschnitt des Strassburger Münsters), die Lage der Drucklinien mit und ohne Winddruck

ingezeichnet, erstere punktiert gestrichelt, letztere einfach gestrichelt. Der Vorgang bei Einwirkung des Windes von links ist folgender: 1. Das Dach übt auf beide Mauern einen nach rechts gerichteten Schub aus. 2. In der vom Winde getroffenen linken Mittelwand und deren Pfeiler schiebt sich die Drucklinie etwas nach rechts. 3. Die linke Mittelwand lehnt sich dabei etwas nach rechts über. 4. Infolge des Ueberlehns der Mittelwand entlastet sich der linksseitige Strebebogen etwas (krummere Drucklinie). 5. Beim Ueberlehnen legt sich die linke Mittelwand gegen das Gewölbe des Mittelschiffes und versetzt dieses in grössere Querspannung, die sich in flacheren Drucklinien durch den Gurt und durch die oberen Teile der Kappen überträgt. 6. Durch die grössere Pressung des Gewölbes wird die rechte Mittelwand etwas nach rechts übergeneigt, dabei schiebt sich zugleich in ihr und in dem Pfeiler unter ihr die Drucklinie etwas nach rechts. 7. Die rechtsseitigen Strebebögen bekommen durch das Gegenlehnen der Wand grössere Spannung, welche straffere Drucklinien erzeugt. 8. In dem äusseren Strebepfeiler rechts schiebt sich wegen des grösseren Strebebogenschubes die Drucklinie nach rechts.

Man muss sich das ganze System als beweglich denken, trotz der Starrheit der Stoffe sind kleine elastische Bewegungen, wenn sie auch nur nach Millimetern messen, vorhanden, die in entsprechenden Grenzen dem Gefüge des Mauerwerkes keinen Schaden zufügen. Die schwächeren Teile werden sich zuerst etwas fortschieben, die stärkeren werden sich weniger bewegen; haben sich ein starker und ein schwacher Konstruktionsteil unter ähnlichen Verhältnissen in dieselbe Arbeit zu teilen, so wird demnach der stärkere auch den grösseren Anteil an der Leistung auf sich nehmen.

Würde z. B. der Mittelpfeiler unten sehr dünn oder gar auf ein Kugelgelenk gestellt sein, so würde die Mittelwand pendeln, beim geringsten Uebermass von Schub von rechts oder links würde sie sich gegen das Gewölbe oder den Strebebogen lehnen und hier den ganzen Schub abgeben ohne etwas nach unten zu tragen. Würde umgekehrt der Mittelpfeiler sehr kräftig, die obere Verstrebung aber sehr schwach oder gar fehlend sein, so würde der Pfeiler den grösseren bez. ganzen Schub auf den Boden übertragen. Man hat es demnach in weiten Grenzen durch schickliche Einrichtung der Konstruktion in der Hand, entweder mehr die Mittelpfeiler oder andererseits die äusseren Strebepfeiler mit ihrem ganzen System der Querverstrebung zur Uebertragung der Schübe heranzuziehen.

Den Mittelpfeiler wollte man aber so dünn wie möglich machen, daher durfte man ihm möglichst nur senkrechte zentrale Druckkräfte mässiger Grösse zuführen, dagegen musste man die Schübe, besonders aber „wechselnde“ Seitenschwankungen ihm möglichst fernhalten, für diese trat ein „um so festeres Strebesystem“ ein.

Die Festigkeit des Strebesystems ist aber weniger durch eine Häufung der Massen, als durch ihre richtige Verteilung zu erzielen. Schon bei den Strebebögen ist vorhin darauf hingewiesen, dass ihre Steifigkeit durch eine entsprechende Gestaltung erzielt werden kann, dass sie im übrigen aber ziemlich leicht sein können.

Ein wichtiges Glied in der Kette der Querversteifungen bildet das Mittelschiffgewölbe, dem die Aufgabe zufällt, wechselnde Schübe zu übertragen, es lohnt das Gewölbe auf Grund dieser seiner Funktion kurz zu betrachten. Damit

Windübertragung durch die Gewölbe.

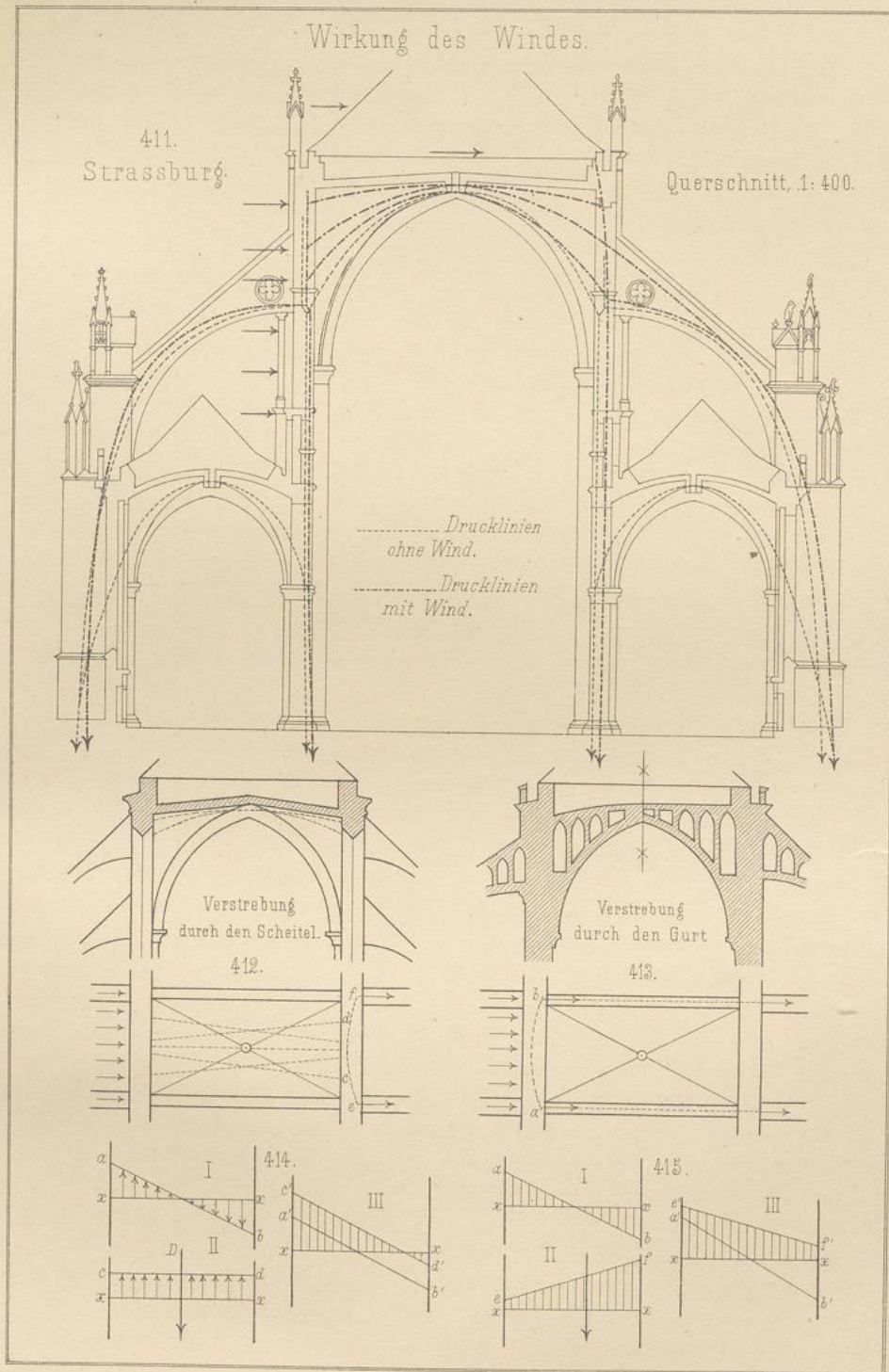
das Gewölbe eine grössere Schubübertragung, oder was dasselbe sagt, eine grössere seitliche Einspannung aufnehmen kann, müssen sich in ihm flachere Drucklinien als gewöhnlich bilden können, andernfalls wird es unter der grösseren Pressung im Scheitel gehoben und eventuell zerstört werden, es würde aus diesem Grunde ein leichtes Tonnengewölbe zur Querversteifung wenig geeignet sein, während ein ebenso leichtes Kreuzgewölbe dieselbe durch die Eigenart seiner Form zu leisten vermag.

Ein Gewölbe kann sich überhaupt nur im Gleichgewicht halten, wenn die äusseren Kräfte, welche es von den Seiten her einspannen, genau so gross sind wie die Schubkräfte, welche das Gewölbe nach aussen abgibt, wie ja überhaupt nur ein Ruhestand denkbar ist, wenn überall sich Kraft und Gegenkraft aufhebt. Würde die einspannende Kraft zu gross, so würde sie das Gewölbe in die Höhe drängen, würde sie zu klein, so würde sich das Gewölbe nach unten durchdrücken. Für gewöhnlich wird der Gewölbschub aufgehoben durch die umgekehrt gerichteten Gegendrücke der Widerlager, die als einspannende Kräfte für das Gewölbe anzusehen sind. Tritt an der einen Seite ein Winddruck hinzu, so gesellt er sich zu dem Gegendruck des Widerlagers zu einem grösseren Gegendruck, dem sich unbedingt ein grösserer Schub des Gewölbes entgegenstellen muss, wenn das Gleichgewicht erhalten bleiben soll. Ein Gewölbe kann bei gleichbleibender Schwere aber nur einen grösseren Schub liefern, wenn sich flachere Drucklinien in ihm bilden können. Somit erzeugt der Winddruck im Gewölbe grösseren Schub und flachere Drucklinien. Dieser grössere Schub wirkt nun aber nicht allein an der Windseite, sondern auch an der dem Winde abgewandten Seite, wo er lediglich durch den Gegendruck der Widerlagskörper aufgehoben werden muss und zwar bei Strebebögen zum grössten Teil durch diese.

Im ungünstigsten Falle kann der Schub, den diese Strebebögen an der windfreien Seite bekommen, sich steigern bis zu der Summe aus gewöhnlichem Wölbschub, dem durch das Gewölbe übertragenen Winddruck gegen die Mittelwand und dem ganzen (durch das Dachwerk eventuell auch Gewölbe übertragenen) Winddruck gegen die Dachfläche. Gewöhnlich werden sie aber weniger beansprucht werden, da die Mittelpfeiler einen Teil der Leistung auf sich nehmen.

Wie gesagt, würde ein Tonnengewölbe zur Uebertragung des Windschubes sich wenig eignen, da in ihm die Drucklinien nur wenig Spielraum haben, es müsste denn das Gewölbe sehr dick, hoch hintermauert und überdies so schwer und stark schiebend sein, dass der Winddruck dem eigenen Wölbschub gegenüber relativ klein sein würde. Ganz anders verhält es sich mit dem Kreuzgewölbe, selbst wenn seine Kappen sehr dünn sind, pflegt der Gurt einen höheren Querschnitt zu haben, in welchem flachere Drucklinien möglich sind; das ist aber nicht der einzige Weg, der Querschnitt eines Kreuzgewölbes in der Mittelachse ist horizontal oder bei überhöhten Gewölben immerhin ziemlich flach, in diesen oberen Teilen des Kreuzgewölbes können sich flachere Stützlinien bilden, hier ist eine Querverspannung, oder wenn man will, Querverspreizung möglich, wie sie durch die eingezeichneten Linien im Querschnitt 411 und im Grundriss 412 zu Tage treten. Was der Gurt mit seiner Hintermauerung nicht leisten kann, muss der Wölbscheitel auf sich nehmen. Der im Wölbscheitel übertragene Wind kommt bei der abgekehrten Seite oben an der Mauer bei *c d* zum Angriff und sucht die Mauer auszubauchen, dem muss ihre Steifigkeit entgegenstehen, sie wirkt wie ein im Grundriss liegender scheinrechter Bogen und überträgt den Druck auf die Stützpunkte *e* und *f*. Hier müssen die Strebebögen anfallen um diesen Druck aufzunehmen. Damit löst sich das Rätsel, weshalb sehr viele Strebebögen dicht unter der Dachtraufe sitzen. Natürlich darf ein weit oben angreifender Strebebogen nicht zu schwer sein, damit er für gewöhnlich die Mauer nicht zu sehr nach innen drängt. Da es sich darum handelt, auch den tiefer

Tafel XLII.



wirkenden Wölbschub aufzunehmen, muss der Strebebogen mit einer hohen senkrechten Fläche gegenfallen (vgl. Fig. 403 und 405). Wird diese Fläche zu hoch und der Bogen zu unerwünscht schwer, so ist es besser an seiner Stelle zwei anzuwenden, einen höheren, der vorwiegend zum Abfangen des schwankenden Windschubes dient, und einen tiefer liegenden, der den mehr stetigen Wölbschub aufnimmt.

Die Uebertragung des Winddruckes im Wölbscheitel gemäss Abb. 412 beansprucht die abgekehrte Wand *ef* stark auf Durchbiegung, dieselbe darf daher über den Fenstern nicht zu dünn sein, man hat sie bei alten Beispielen oft in geschickter Weise durch aussen und innen vorgekragte Bögen erbreitert und durch auflastende Wimperge widerlagsfähiger gemacht.

Diese Beanspruchung der Wand lässt sich ganz oder teilweise vermeiden, wenn man den Gurtbogen genügend steif macht und ihn dadurch an Stelle des Wölbscheitels zur Uebertragung des Windschubes geeignet macht, wie es der Durchschnitt 413 in zwei Abarten links und rechts andeutet. Es muss sich nun in der „vom Winde getroffenen Wand“ der Druck auf die Punkte *a* und *b* übertragen, was hier leicht möglich ist, da sich diese Uebertragung auf die ganze Höhe verteilt und ausserdem der Druck in der hier dem Wölbschub entgegengesetzten Richtung weniger schadet. Man würde dadurch dem mittleren Teile des Gewölbes die Schwankungen mehr fern halten und ausserdem in der Gurtebene ein fest geschlossenes Strebesystem erhalten, das einem grossen Bogen gleich sich vom Erdboden links durch Strebepfeiler, Strebebogen und steifen Gurt hindurch bis zur Sohle des Strebepfeilers rechts hinüberspannt. Ob Gurtversteifungen in der durchbrochenen Art von Fig. 413 bei historischen Beispielen ausgeführt, ist in diesem Augenblick nicht bekannt, eine gute Zwickelausmauerung und Uebermauerung der unteren Gurtschenkel verrichtet auch im kleinen dieselben Dienste. — Oft kann man beobachten, dass die Alten an richtiger Stelle Gurtübermauerungen angelegt hatten, welche die Neuzeit aus Unkenntnis beseitigt hat.

Versteifung
durch die
Gurtbögen.

Nicht unerwähnt soll bleiben, dass auch die Dachbalken einen wesentlichen Anteil an der Uebertragung des Windschubes und an der ganzen Querversteifung nehmen können und in vielen Fällen in der That nehmen. Mindestens sind sie geeignet, den ganzen Windschub des Daches, sobald die Wand an der Windseite sich nur minimal überneigt, auf die abgekehrte Wand und die dortigen Strebebögen zu tragen; das vermögen sie selbst dann, wenn sie gar nicht fest mit der Wand verbunden, sondern einfach aufgelagert sind (durch die Reibung an der Auflagerfläche).

Es ist zum Schlusse noch eine andere Wirkung des Windes auf die Mittelwand hervorzuheben. Eine hochhinausragende Wand wird in dem Stück zwischen Seitenschiff und Mittelschiffgewölbe auf Durchbiegung beansprucht in ganz ähnlicher Weise, wie ein senkrecht stehendes Brett unter einem seitlichen Druck auszubiegen sucht. Dabei entsteht an der Innenseite Zug, an der Aussenseite Druck. Fig. 414 I stellt die Verteilung der Spannungen in einem Querschnitt des Wandpfeilers schematisch dar.

Durchbiegung der
Mittelwand.

Die Grösse der Spannungen berechnet sich durch Aufsuchen des Biegemomentes in ähnlicher Weise wie bei einem belasteten Balken mit dem einzigen Unterschied, dass dieser wagerecht, der Wandpfeiler aber senkrecht steht. In diesem Falle würde der Fusspunkt des Pfeilers als der eine (als eingespannt zu betrachtende) Auflagerpunkt und das obere Wandende am Gewölbe als der andere Auflagerpunkt anzusehen sein. Das grösste Biegemoment würde in einer gewissen Höhe oberhalb des Seitenschiffdaches zu erwarten sein, über die einfache Art seiner Aufsuchung soll nichts

weiter hinzugefügt werden, es möge der Hinweis auf diese Windwirkung und die daraus zu ziehenden Schlussfolgerungen genügen.

Zu den in Fig. 414 *I* dargestellten Zug und Druckspannungen des Querschnittes gesellt sich der durch die oberen Lasten hervorgerufene Wand- oder Pfeilerdruck *D*. (414 *II*). Geht *D* gerade durch den Schwerpunkt des Querschnittes, so erzeugt er gleichmässig verteilte Druckspannungen. Die Spannungen von *I* und *II* addieren sich algebraisch, so dass die Gesamtbeanspruchung des Querschnittes durch Fig. 414 *III* gekennzeichnet wird. An der Aussenkante addieren sich die „Druckspannungen“ von *I* und *II*, an der Innenkante subtrahieren sich „Zug und Druck“. War hier der Zug grösser, so kann noch ein Ueberschuss von Zug verbleiben, wie es die Figur zeigt. Der letztere wird vermieden und die ganze Spannungsverteilung gleichmässiger, wenn der Druck *D* nicht in der Mitte, sondern etwas näher der Innenkante angreift, wie es durch die entsprechenden Spannungsbilder von Fig. 415 veranschaulicht wird.

Somit macht es der Winddruck gegen hochragende Mittelwände erwünscht, die Drucklinie in der oberen Wandhälfte mehr an der Innenkante zu halten, für den unteren Teil des Pfeilers ist es aber aus ähnlichen Gründen besser, den Druck von der Innenkante fern zu halten; es würde deshalb eine Druckführung etwa nach Art der Fig. 410 als günstig zu bezeichnen sein. Dieses kann nach den Ausführungen von Seite 161 aber erzielt werden durch einen nicht zu tief angreifenden und nicht zu stark schiebenden Strebebogen. Zwei übereinander befindliche Strebebögen können auch hier wieder umso besser wirken, sie werden überhaupt das obere Wandende sicherer führen, so dass es mehr die Eigenschaften eines fest eingespannten Balkenendes annimmt.

Auch diese durchbiegende Einwirkung des Windes auf die Mittelwände ist nicht zu unterschätzen, sie ist bei den grössten Kathedralen so bedeutend, dass die Querschnitte für die Wand bez. die Wandpfeiler gerade richtig bemessen sind, um sie genügend sicher aufzunehmen. Dass der gewaltige Winddruck gegen die grossen Fensterflächen gleichfalls grosse Beachtung fordert und auch in der Konstruktionsweise gefunden hat, sei an dieser Stelle nur beiläufig erwähnt.

Wenn nicht der beschränkte Raum Einhalt geböte, würden wir gern den Einfluss des Windes auf das Strebesystem noch weiter verfolgen, umso mehr als ihm unseres Wissens an keiner anderen Stelle eine hinlängliche Beachtung geschenkt ist. Jedenfalls kann auch diese Betrachtung nur dazu dienen, die Hochschätzung vor den alten Meistern zu erhöhen; je mehr man in die Einzelheiten ihrer Konstruktionen eindringt, umso mehr lernt man sie bewundern. — Unsere jetzige Zeit hat auf dem Gebiete der Steinkonstruktion trotz all unserer Theorien nichts hervorgebracht, das sich an Kühnheit des Gedankens und an Grossartigkeit der konstruktiven Auffassung auch nur annähernd mit jenen Werken der Alten zu messen vermöchte.