

Rissbildung in gemauerten Kreuzgewölben

Autor(en): **Barthel, Rainer**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte**

Band (Jahr): **70 (1993)**

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-53322>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Rissbildung in gemauerten Kreuzgewölben

Crack Formation in Masonry Cross Vaults

Formation de fissures dans les voûtes en maçonnerie

Rainer BARTHEL

Dr. Ing.

Büro für Baukonstr.
Karlsruhe, Germany



R. Barthel, born 1955, received his Civil Eng. degree at the Techn. Univ. Karlsruhe and has been working in Karlsruhe and London on the structural design of new buildings and renovation of historical monuments.

ZUSAMMENFASSUNG

Aus Schadensaufnahmen werden typische Riss- und Schadensbilder in Abhängigkeit der Gewölbeform entwickelt. Die durchgeführten Finite-Element-Berechnungen berücksichtigen die Rissbildung infolge einer horizontalen Auflagerverschiebung. Bereits bei sehr kleinen Verschiebungen entstehen die als typisch erkannten Rissbilder. Durch Vergleich der errechneten Rissbilder mit den an Gewölben dokumentierten, lassen sich einerseits die Berechnungen kontrollieren, andererseits können die Rissbilder damit theoretisch erklärt werden. Ziel ist es, differenziertere Tragmodelle als bisher zu entwickeln, um daraus wirksamere und zurückhaltendere Instandsetzungsmassnahmen abzuleiten.

SUMMARY

Typical crack patterns depending on the various types of cross vaults are compiled and presented. The Finite Element Analysis simulates the crack formation due to horizontal displacements of the abutments. The typical crack patterns are created by very small displacements. The calculations can be checked by comparison of the simulated with the real crack patterns. On the other hand, the cracks can be explained theoretically by the analysis. The objective is to get a more detailed understanding of the statical behaviour of cross vaults in order to develop more effective and less drastic repair measures.

RÉSUMÉ

L'article présente un classement des modes typiques de fissuration en fonction de différents types de voûtes. La méthode par éléments finis permet de simuler la formation de la fissure résultant des déplacements horizontaux des culées. Les modes typiques de fissuration sont créés par de petits déplacements. Les calculs peuvent être contrôlés par comparaison de la simulation avec les fissures réelles. Il est aussi possible d'expliquer ces modes de fissuration de façon théorique par une analyse du développement des fissures. Le but de l'étude est d'obtenir une meilleure compréhension du comportement statique des voûtes afin de développer des mesures de réparation plus efficaces et moins destructrices.



1. Einleitung

Bei der statischen Beurteilung von Kreuzgewölben treten in der Praxis immer wieder Unsicherheiten auf. Die Deutung von Schäden und die eindeutige Benennung ihrer Ursachen ist oft schwierig, da zu wenig über den Kraftfluß und dessen Abhängigkeiten von Form-, Konstruktions- und Materialparametern bekannt ist. Die Anwendung baustatischer Methoden der Berechnung wird erschwert durch die oft doppelt gekrümmte, dreidimensionale Form der Gewölbeflächen, den besonderen Materialeigenschaften des Mauerwerks sowie den Auflager- und Randbedingungen. So entscheidet man sich in der Praxis häufig zu Sicherungsmaßnahmen, die entweder nicht zum gewünschten Ziel führen oder allzu sehr auf der sicheren Seite liegen und damit aufwendiger und teurer als nötig sind.

In einem von der DFG geförderten Forschungsprogramm wurden Berechnungen mit der FE-Methode durchgeführt (1). Deren Ziel war es, für einige Grundtypen von Kreuzgewölben realistischere Tragmodelle als bisher zu entwickeln, um damit eine Grundlage für gezieltere und zurückhaltendere Sicherungsmaßnahmen zur Verfügung zu stellen.

2. Einige Grundformen der Kreuzgewölbe

Aus der nahezu unendlichen Vielfalt der existierenden Gewölbeformen werden vierteilige Kreuzgewölbe über rechteckigem oder quadratischem Grundriß für die näheren Betrachtungen ausgewählt. Für vergleichende Untersuchungen und eine numerische Erfassung werden vier geometrische Grundformen theoretisch definiert (Bild 1).

a) Kreiszyklindrisches Kreuzgewölbe

b) Kreuzgewölbe mit geraden Scheiteln (halbkreisförmige Kreuzbögen, spitzbogige Gurt- und Schildbögen, gleiche Scheitelhöhen. Kappen sind leicht verwundene Flächen mit geraden Höhenlinien).

c) Kreuzgewölbe mit gebusten Kappen (Geometrie der Bögen wie bei b)

d) Kuppelartiges Kreuzgewölbe (Gurt- und Schildbogen mit niedrigeren Scheiteln)

Alle Gewölbe außer dem kreiszyklindrischen sind über allen rechteckigen Grundrissen möglich. Der Vergleich der Höhenlinienverläufe zeigt, wie unterschiedlich die Gewölbeformen schon bei dieser engen Auswahl von Varianten ist.

3. Typische Schäden

Die für die jeweilige Gewölbeform typischen Schadensbilder werden zum einen mit Hilfe von Schadensdokumentationen realer Gewölbe und zum anderen aus den unten vorgestellten Ergebnissen der FE-Berechnungen ermittelt. Zahlreiche Schadensaufnahmen und Gutachten von Architektur- und Ingenieurbüros sowie selbst erstellte werden ausgewertet. Die Berechnungen helfen, die typischen Rißbilder zu erkennen und zunächst nicht erklärbare oder zufällig erscheinende Risse theoretisch nachzuvollziehen.

Die häufigste Ursache für Schäden und Risse ist das Nachgeben der Auflager infolge der horizontalen Gewölbekräfte. In einer Reihung von Gewölben, wie z.B. in einem Kirchenschiff, bedeutet dies die Vergrößerung der Spannweite bei gleichbleibender Gewölbekbreite. Auf diesen Fall werden alle weiteren Betrachtungen konzentriert.

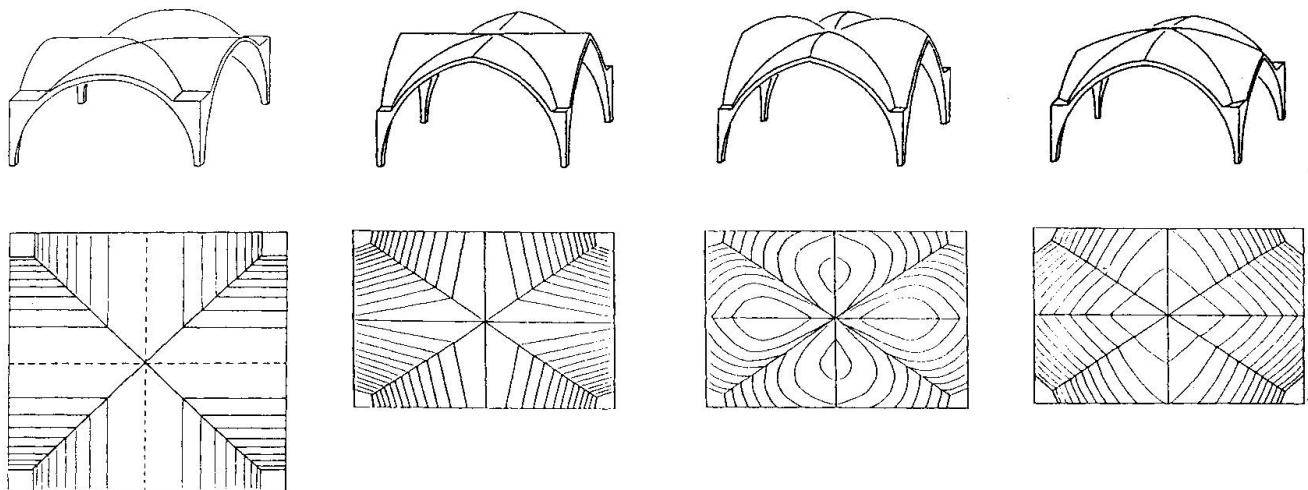


Bild 1: Vier Grundformen der Kreuzgewölbe, Höhenlinien

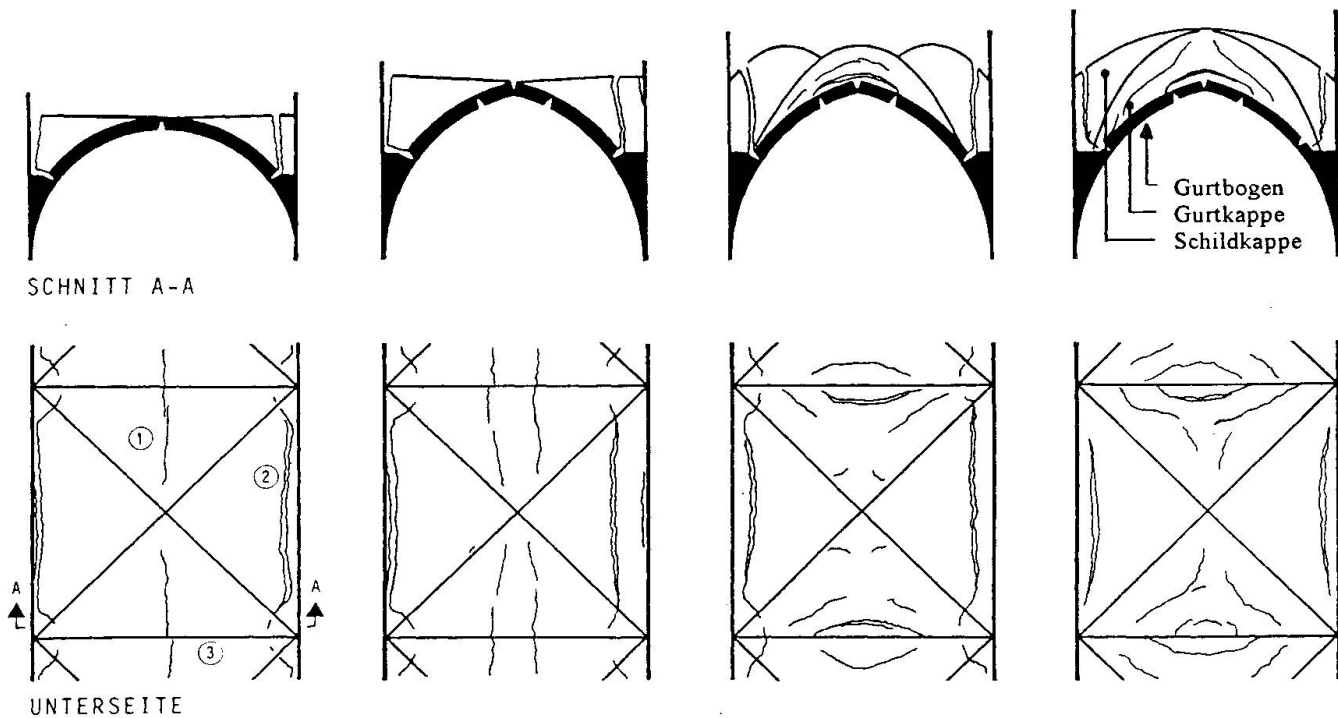


Bild 2: Typische Rißbilder infolge einer horizontalen Auflagerverschiebung

3.1 Rißbilder

Aufgrund der fehlenden Zugfestigkeit des Mauerwerkes zergliedert sich das Kappenmauerwerk durch Abrisse und Gelenkbildungen in einzelne Teile. Es entsteht dabei ein Dreigelenkmechanismus, der als statisch bestimmtes System den Auflagerverschiebungen folgt und als Rißbild erkennbar ist.

Der einfachste Bewegungsmechanismus bildet sich am kreiszylindrischen Kreuzgewölbe. Es entstehen ein unten klaffender Biegeriß entlang den Gurtkappenscheiteln und oben klaffende Biegerisse in Auflagernähe. Außerdem reißen die Schildkappen von den Schildwänden ab. Da die Gewölbeteile an den Biegerissen relativ zueinander Rotationen erfahren, können diese Stellen als Gelenklinien bezeichnet werden. Damit entsteht wie in einem Tonnengewölbe ein Dreigelenksystem ohne innere Zwängungen (Bild 3).



In den doppelt gekrümmten Gurtkappen des gebusten und kuppelartigen Kreuzgewölbe bilden sich Abrisse von den Gurtbögen. Ein Gelenkmechanismus wie beim Tonnengewölbe oder wie am kreiszylindrischen Kreuzgewölbe mit geradlinigen und zueinander parallelen Gelenklinien kann sich hier wegen den gekrümmten Scheitellinien nicht einstellen. In Bild 4 ist ein möglicher Bewegungsmechanismus dargestellt, wie er sich aus den FE-Berechnungen herleiten läßt. Der niedrigere Kappenbereich entlang des Gurtbogens senkt sich bei einer Auflagerverschiebung mehr als der höhere Mittelteil und reißt von diesem ab. Jeder Kappenteil bildet ein eigenes Dreigelenksystem. Mit diesem Modell lassen sich die Rißbilder an kuppelartigen Gewölbe deuten.

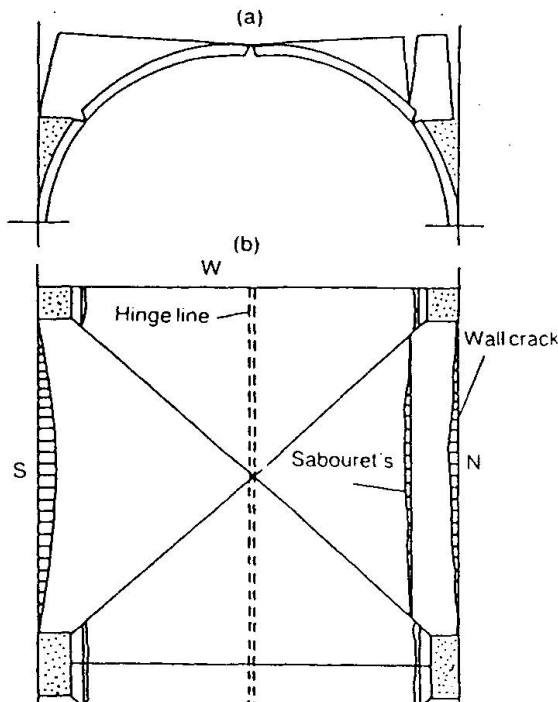


Bild 3: Bewegungsmechanismus am kreiszylindrischen Kreuzgewölbe infolge einer Auflagerverschiebung, aus (2)

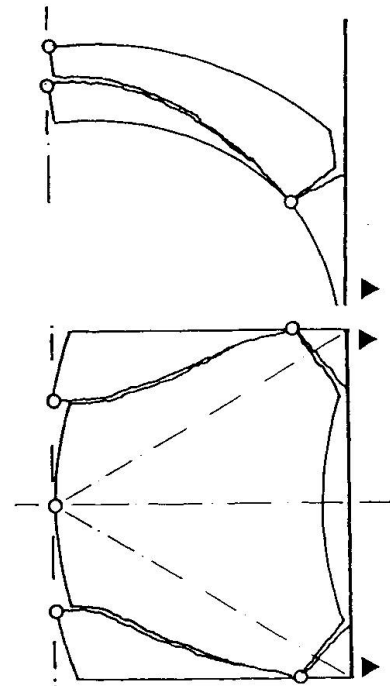


Bild 4: Bewegungsmechanismus am kuppelartigen Kreuzgewölbe

3.2 Schäden an den Rippen

Grundsätzlich sind Rippen mit schubsteifer Verbindung zu den Kappen von Rippen ohne schubsteife Verbindung zu den Kappen zu unterscheiden. Als schubsteife Verbindung kann gelten, wenn z.B. Rippenformsteine auch Teil des Kappenmauerwerkes sind und mit diesem im Verband gemauert sind.

Im Fall einer solchen schubsteifen Verbindung ergeben sich bei einer Auflagerverschiebung große Schäden am unteren Gelenk. Das Gelenk bildet sich nicht in der Kappe, sondern punktförmig an der Vorderkante der Kreuzrippe. Druck- und Querzugversagen der Rippensteine infolge hoher Kantenpressungen führen dann jedoch oft zu einer lokalen Zerstörung der Rippe und einer Zurückverlagerung des Gelenkes in die Kappe.

Im weitaus häufigeren Fall ohne starre Verbindung zu den Kappen, sind Risse zwischen Kappe und den Rippensteinen typisch. Oft sind Rippen, die zwar ins Kappenmauerwerk einbinden aber nicht verankert sind, deutlich herausgezogen. Schlußsteine sind häufig abgelöst. Abplatzungen der Rippenvorderkanten gibt es in Auflagernähe, im Bereich des Schlußsteines teilweise an der Oberseite der Rippensteine.

4. Berechnungen

4.1 Idealisierung und Annahmen

Mit der FE-Methode werden einige der Grundformen unter dem Lastfall Eigengewicht und dem Lastfall Eigengewicht plus Auflagerverschiebung berechnet. Verwendet wird das Programm ADINA. Das darin zur Verfügung stehende Materialgesetz für Beton wird an die Eigenschaften des Mauerwerks angepaßt. Folgende Randbedingungen und Annahmen werden getroffen:

Geometrie: Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wird bei allen Berechnungen die Spannweite s auf 10m und die Gewölbedicke d auf 25cm festgelegt. Die kleine Spannweite bzw. die Jochbreite b wird variiert. Es werden die Grundrißverhältnisse s/b gleich 1/1, 3/2 und 2/1 berechnet.

Randbedingungen: Das Gewölbe ist, wie in einem Kirchenschiff, Glied einer Gewölbereihe mit den entsprechenden Symmetriebedingungen entlang den Gurtbögen. Die Höhe des rechnerischen Auflagers wird auf die halbe Scheitelhöhe festgelegt. Damit werden ca.95% der Gewölbeffläche berücksichtigt, da der verbleibende, nicht berücksichtigte Zwickel sehr schmal ist.

Material: Vorgegeben wird eine nicht-lineare Spannungs-Dehnungsbeziehung im Druckbereich, ein Tangentenmodul von 3000 MN/m² und eine auf 60 kN/m² begrenzte Zugfestigkeit. Das spezifische Gewicht ist 20 kN/m³, die Querdehnzahl 0,25. Die Orthotropie wird nicht berücksichtigt. Berechnungen am kreiszylindrischen Kreuzgewölbe zeigen, daß er gering ist.

Elementmodell: Es werden Volumenelemente mit je 20 Knoten mit kubischem Ansatz in teilweise zweilagiger Schichtung übereinander verwendet. Damit können tief klaffende Biegerisse und Kantenpressungen simuliert werden.

4.2 Kreiszylindrisches Kreuzgewölbe

Die Spannungstrajektorien im Lastfall Eigengewicht zeigt Bild 5. Sie verlaufen nicht geradlinig zum Kreuzbogen, wie man es bei einer Stützlinienberechnung annehmen würde, sondern werden schon weit oben in Richtung Auflager abgelenkt. Nahezu die gesamte Kappe steht unter einem biaxialen Druckspannungszustand. Die Spannungen liegen überall weit unterhalb der Bruchspannung von Mauerwerk.

Das Gewölbe reagiert sehr stark auf Auflagerverschiebungen. Schon während des ersten Millimeters entstehen alle typischen Risse und die Auflagerkraft wird kleiner (Bild 6). Nach zwei Millimeter Verschiebung beträgt die resultierende Horizontalkraft nur noch knapp 75% der ursprünglichen. Bei weiteren Verschiebungen ändert sie sich nur noch wenig. Die Spannungstrajektorien zeigen gegenüber denen des Lastfalles Eigengewicht einen völlig veränderten Verlauf. Es entsteht im wesentlichen das Reißbild, welches dem Dreigelenkmechanismus in Bild 3 entspricht. Der Biegeriß am Scheitel ist bereits von unten her über zwei Drittel des Querschnittes aufgerissen. In diesem Zustand tritt entlang den als "Gelenklinien" bezeichneten Bereichen noch keine Plastifizierung ein. Es handelt sich somit eher um "elastische Gelenke" als um "plastische Gelenke".

Das Ergebnis für die resultierende Horizontalkraft läßt sich mit Ergebnissen anderer Berechnungsansätze vergleichen, die allerdings alle die Größe der Auflagerverschiebung nicht berücksichtigen (Bild 7): Für den Lastfall Eigengewicht stimmt das Ergebnis der FE-Berechnung sehr gut mit dem von Heyman (3) überein. Eine Stützlinienberechnung, ausgehend von Bögen entlang den Falllinien, ergibt wesentlich niedrigere Werte. Bei zunehmender Auflagerverschiebung nimmt die Horizontalkraft ab und nähert sich dem theoretischen Grenzwert, der sich bei Vorgabe von Gelenken mit einer Ausmitte von $d/2$ rechnerisch ermitteln läßt. Der Wert von Pieper (4), der von einer aus Erfahrung festgelegten Gelenklage ausgeht, liegt etwas höher als das Ergebnis der FE-Berechnung. Die Reduzierung der resultierenden Auflagerkraft infolge kleiner Auflagerverschiebungen ist für den Nachweis bestehender Gewölbe von Bedeutung.

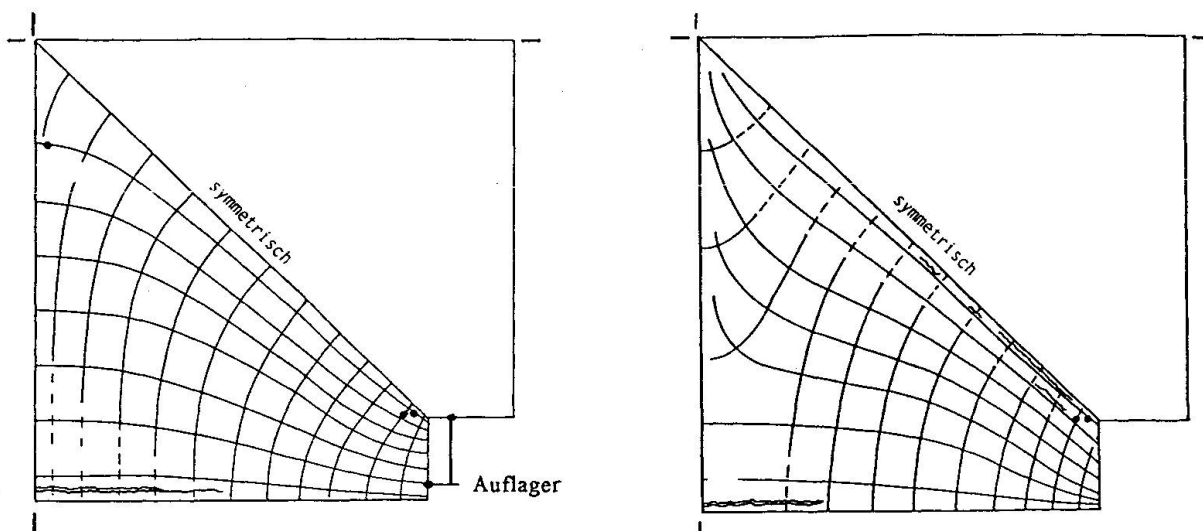


Bild 5: Spannungstrajektorien am kreiszylindrischen Kreuzgewölbe bei starren Auflagern
 a) Oberseite b) Unterseite

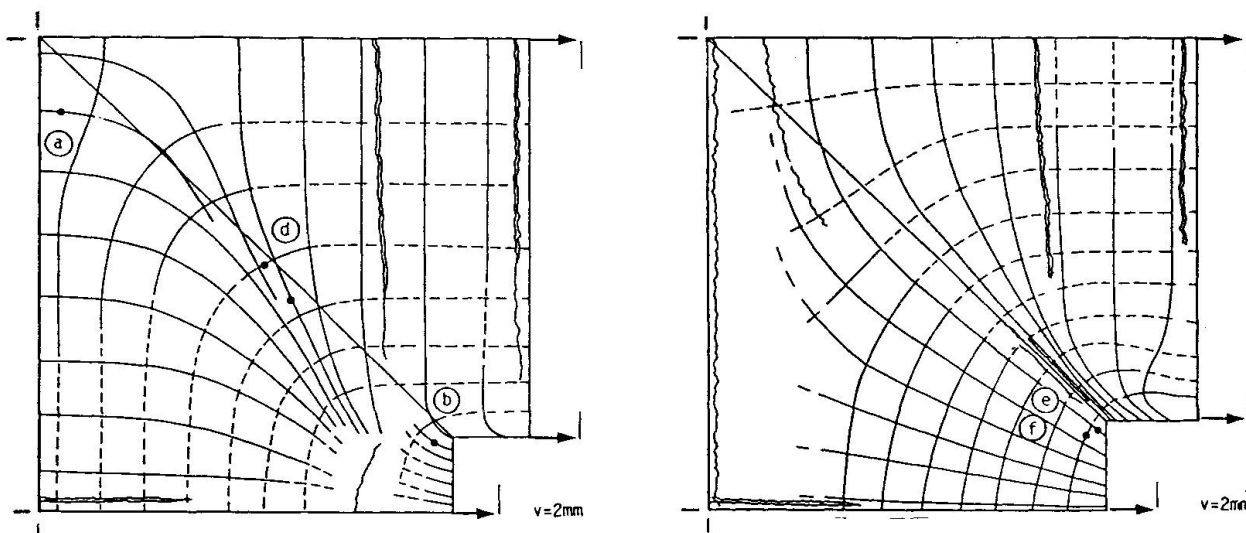


Bild 6: Spannungstrajektorien und Risse am kreiszylindrischen Kreuzgewölbe infolge einer Auflagerverschiebung
 a) Oberseite b) Unterseite

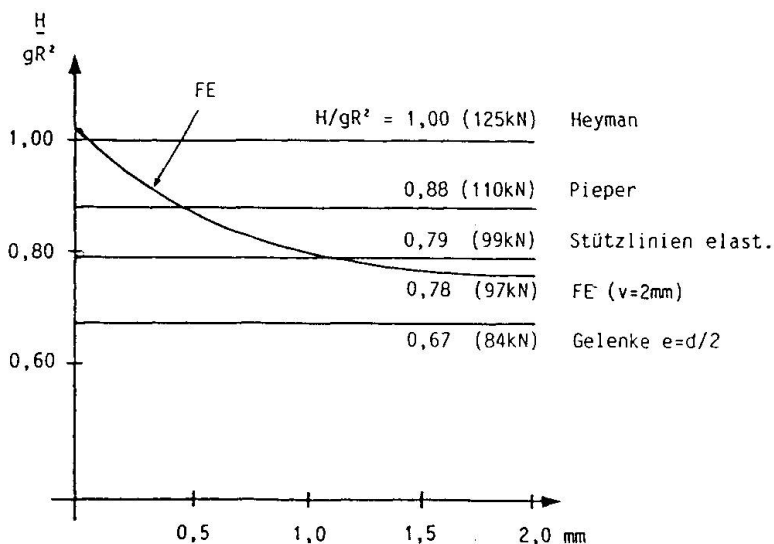


Bild 7: Resultierende Horizontalkraft H am kreiszylindrischen Kreuzgewölbe in Abhängigkeit der Auflagerverschiebung, Vergleich mit anderen Berechnungsergebnissen
 (g...Gewicht pro Flächeneinheit, R... Krümmungsradius der Kappen, Werte in Klammern für Gewölbedicke d=0,25m, R=5m, $\gamma=20 \text{ kN/m}^2$)

4.3 Kuppelartiges Kreuzgewölbe

Liegen die Scheitel der Gurtbögen nicht sehr viel tiefer als der Kreuzbogenscheitel, so ist der Kräftefluß im Lastfall Eigengewicht ähnlich dem des Kreuzgewölbes mit geraden Scheiteln. Erst bei einer Auflagerverschiebung wird ein wesentlicher Unterschied sichtbar. In der Gurtkappe entstehen Risse parallel zum Gurtbogen (Bild 8). Der höhere Teil trennt sich vom niedrigeren Teil der Gurtkappe. Desweiteren konzentrieren sich die Spannungstrajektorien sehr stark entlang dem unteren Teil des Gurtbogens. Es bildet sich der beschriebene Bewegungsmechanismus mit den typischen Rissen (Bild 4). Im gewählten FE-Modell läßt sich das untere Gelenk nicht vollständig simulieren.

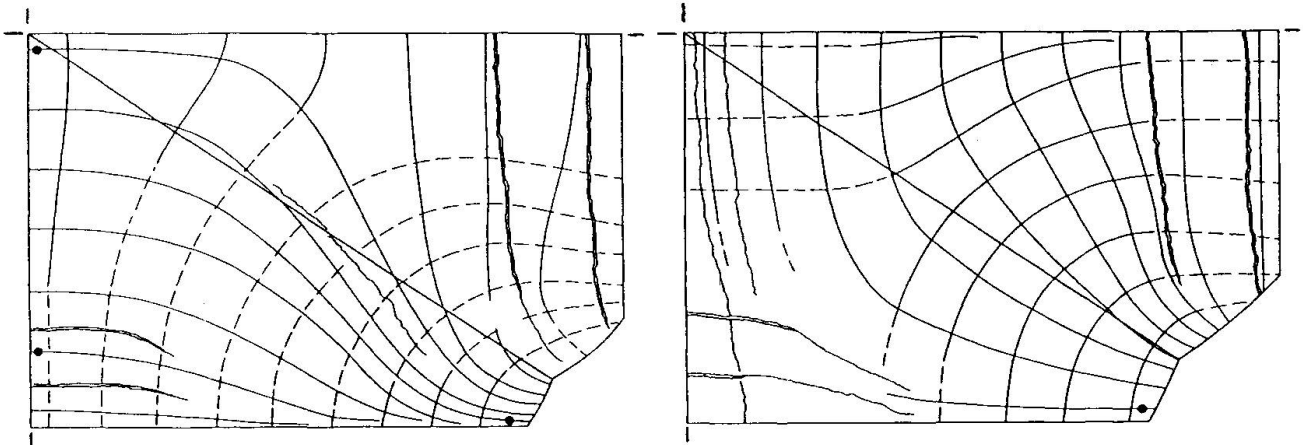


Bild 8: Spannungstrajektorien und Risse am kuppelartigen Kreuzgewölbe infolge einer Auflagerverschiebung a) Oberseite b) Unterseite

4.4 Gebustes Kreuzgewölbe

Der Spannungsverlauf steht in keinem direkten Zusammenhang mit dem Verlauf der Höhenlinien. Die Kräfte laufen über die Scheitellinien hinweg, ohne daß die Busung der Kappen an ihrem Verlauf direkt erkennbar wäre. Anders als bei den anderen Gewölben konzentrieren sich die Kräfte deutlich entlang dem Kreuzbogen.

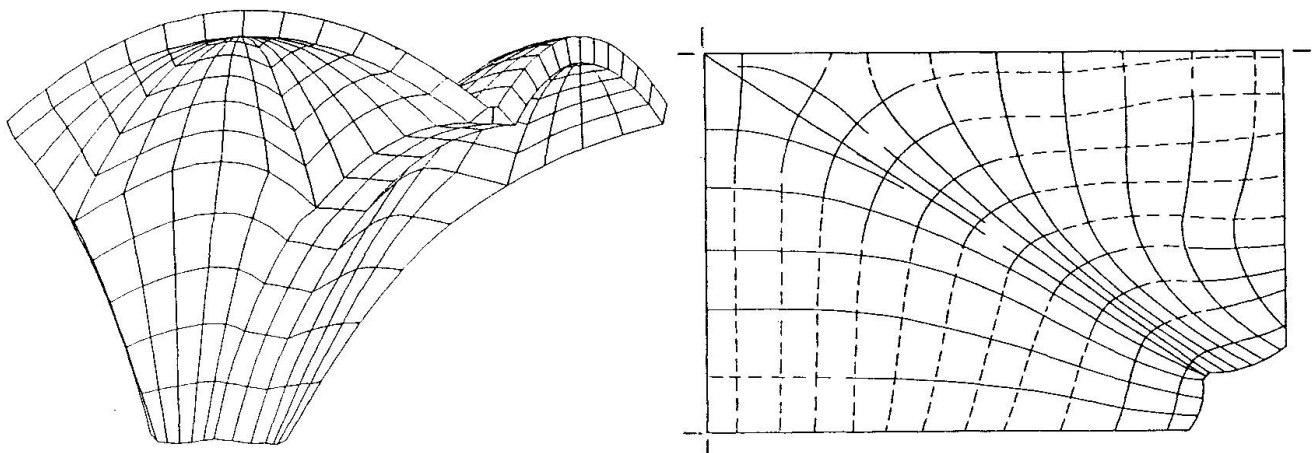


Bild 9: Kreuzgewölbe mit gebusten Kappen a) Elementnetz b) Spannungstrajektorien an der Oberseite

4.5 Tragwirkung der Rippen

Eine mit den Kappen schubsteif verbundene Rippe wird durch zusätzliche Balkenelemente entlang dem Kreuzbogen des kreiszylindrischen Kreuzgewölbes berücksichtigt. Erst bei einer unrealistisch



hohen Dehnsteifigkeit wird ihr Einfluß signifikant. So werden z.B. bei Annahme einer Sandsteinrippe mit einer Querschnittsfläche von $A = 45 \times 45 \text{ cm}$ und einem Elastizitätsmodul von $E = 10000 \text{ MN/m}^2$ die Spannungstrajektorien zwar deutlich von der Rippe angezogen, aber sie verlaufen immer noch nicht geradlinig zu ihr hin, wie es bei einer Stützlinienberechnung angenommen wird.

Das Zusammenwirken einer nicht schubsteif mit den Kappen verbundenen Rippe wird an einem vereinfachten Ersatzsystem untersucht (Bild 10). Zwischen zwei parallelen, übereinanderliegenden Bögen wird eine Kontaktfläche definiert, welche zwar Druckkräfte, aber keine Zug- und Schubkräfte überträgt. Reibung wird zunächst nicht berücksichtigt. Bei einer Auflagerverschiebung entsteht in jedem Bogen für sich ein Dreigelenkmechanismus. Da sich der untere Bogen etwas mehr senkt als der obere, entsteht zwischen beiden ein dünner Spalt im oberen Bereich. Bedeutender sind aber die gegenseitige Verschiebungen der Bögen zueinander, die sich zwischen dem oberen und unteren Gelenk einstellen, und an wirklichen Gewölben in Form von Rissen zwischen Rippe und Kappe in Erscheinung treten.

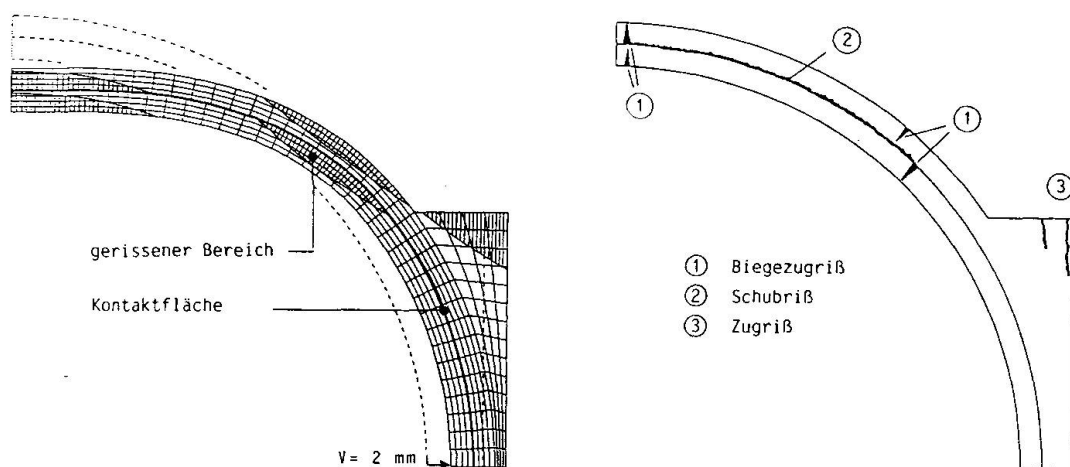


Bild 10: Zwei Bögen mit Kontaktfläche a) Elementnetz b) Rißverlauf

4.6 Standsicherheit

Alle in diesem Rahmen untersuchten Kreuzgewölbe sind standsicher. Die typischen Risse, wie sie bei den berücksichtigten Auflagerverschiebungen entstehen, stellen keine Beeinträchtigung der Standsicherheit des Gesamtgewölbes dar. Vielmehr ist der auf diese Art gerissene Zustand der eigentliche Gebrauchszustand der Gewölbe. Eine Gefährdung der Gesamtstabilität tritt erst bei wesentlich größeren Verschiebungen ein. Bei sich wiederholenden kleinen Auflagerverschiebungen können die beschriebenen Risse jedoch Ausgangspunkt für lokale Gefährdungen sein. Teile entlang den Rißufern können sich lockern und abstürzen. Größere Risse in den Schildkappen, die meist schon beim Ausrüsten entstanden, sind oft mit Steinen und Mörtel ausgestopft und sind gefährdet. Hohe Kantenpressungen an Rippensteinen können zum Versagen ganzer Steine führen. Rippen ohne Verbindung zu den Kappen können dadurch abstürzen. Derartige Schäden können mit lokal begrenzten Maßnahmen behoben werden. Mit Hilfe von differenzierten Tragmodellen lassen sich in vielen Fällen größere Sicherungsmaßnahmen, wie Zuganker im Kirchenschiff oder Spritzbetonschalen auf den Kappen, vermeiden.

Literaturverzeichnis

1. Barthel R., Tragverhalten gemauerter Kreuzgewölbe. Aus Forschung und Lehre, Institut für Tragkonstruktionen, Universität Karlsruhe, 1993.
2. Heyman J., Poleni's problem. Proc Instn Civ. Engrs, Aug 1988.
3. Heyman J., The Stone Skeleton. Int. Journal of Solids Structures, Vol. 2 1966.
4. Pieper K., Sicherung historischer Bauten, 1983.