

Probekapitel

*Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren -
Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele*

Autoren: Konrad Bergmeister, Jürgen Suda, Johannes Hübl, Florian Rudolf-Miklau
Copyright © 2009 Ernst & Sohn, Berlin

ISBN: 978-3-433- 02945-9



Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele

Konrad Bergmeister
Jürgen Suda
Johannes Hübl
Florian Rudolf-Miklau

 **Ernst & Sohn**
A Wiley Company

Wilhelm Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und
technische Wissenschaften
GmbH & Co. KG
Rotherstraße 21, 10245 Berlin
Deutschland
www.ernst-und-sohn.de

 **Ernst & Sohn**
A Wiley Company

wirken die Querhölzer entgegen, indem sie die Längshölzer in ihrer gegenseitigen Lage fixieren. Damit wirken die Querhölzer als Zugstäbe und die Knoten sind dementsprechend auszubilden. Die einer Längsholzlage entsprechenden Querhölzer liegen auf den Längshölzern auf. Da ein Teil der Schubbeanspruchung durch Reibung infolge des vertikalen Drucks aufgenommen wird, müssen die Querhölzer an der Unterseite ausgekehlt werden.

Statisch gesehen wirken Holzkästen nach [29] ähnlich Scheiben. Die luftseitigen Längshölzer, welche durch Querhölzer mit der Mauerrückwand verbunden sind, wirken wie Durchlaufträger. Durch die mit Steinen verfüllten Kästen ergibt sich ein relativ komplexes statisches System. Man untersucht aus diesem Grund erforderlichenfalls nicht nur die Gesamtstabilität der Sperre (Gleiten, Kippen) sondern auch die innere Statik der Kästen. Bei der Bemessung doppelwandiger Sperren wird nach [29] die seitliche Verankerung in der Böschung nicht mitberücksichtigt.

Drahtschottersperren

Bei der Bemessung der Stahlkastensperren können nach [28] Unterlagen von Herstellern oder Handelsfirmen herangezogen werden. In diesen Unterlagen wird das Fundament in der Regel eher breit und der Querschnitt einfach angelegt (Bild 129 A, B). Da in der Wildbachverbauung, aufgrund des steilen Geländes, das Fundament auf ein Minimum reduziert werden soll, besteht die unterste Korbbreite unter Umständen aus einer ein Meter breiten Korbbreite (Bild 131). Diese unterste Reihe fungiert als sogenannte Zange, welche die Sperre nach hinten abstützt. Damit diese Zangenwirkung voll zur Geltung kommen kann, müssen die einzelnen Drahtsteinkörbe miteinander verbunden werden. Diese Verbindungen werden nach [28] in den meisten Fällen mit dicken, eingeflochtenen Drähten oder in manchen Fällen mit dünnem, durchgestoßenem Rundstahl hergestellt.

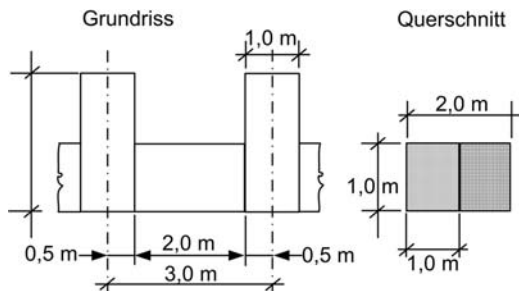


Bild 131. Korblage einer Drahtschottersperre

7.6 Gewölbesperren (Bogensperren)

7.6.1 Allgemeines

Gewölbesperren (Bogensperren) weisen einen bogenförmigen Grundriss mit einem bachaufwärts gerichteten Scheitel auf (Bild 132). In der Wildbachverbauung werden Bogensperren zum größten Teil wasserseitig senkrecht und luftseitig mit einem Maueranzug ausgeführt. Zwischen der ebenen Gewichtsmauer und der Bogenmauer gibt es eine Übergangskonstruktion, die gekrümmte Gewichtsmauer (Bogengewichtsmauer). Allerdings erfolgt bei gekrümmten Gewichtsmauern die Lastübertragung in den Untergrund primär über die Sohlfläche. Der Widerstand gegen Kippen wird ausschließlich über die Geometrie und das Eigengewicht des Sperrkörpers erreicht. Bei einer echten Gewölbesperre hingegen wird ein Teil der horizontalen Belastung (Wasser-, Erddruck) auf die seitlichen Talflanken abgeleitet (Bogenwirkung), während der Rest auf die Sohle übertragen wird (Kragträgerwirkung). Nach Leys [135] entspricht die Bogensperre somit statisch einem liegenden Gewölbe mit gekrümmter Mauerachse, welches an den Kämpfern gelenkig im Gelände eingebunden ist. Der bevorzugte Standort sind daher Schluchtstrecken oder

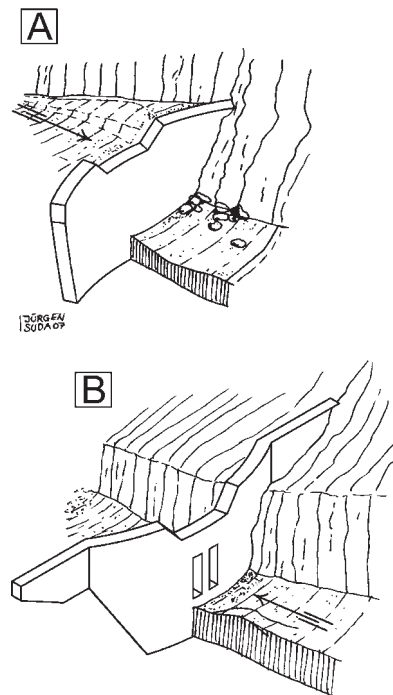


Bild 132. Gewölbesperren: (A) einfache Gewölbesperre (Konsolidierungssperre); (B) Gewölbesperre mit Flügeln und Dolen (Dosiersperre)

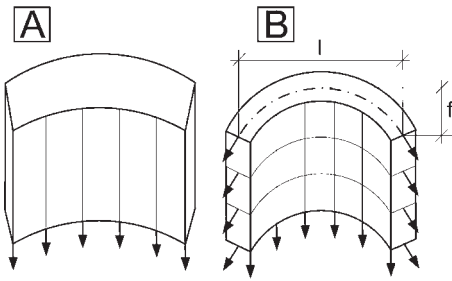


Bild 133. Unterscheidung in der Lastabtragung: (A) gekrümmte Gewichtsmauer (Bogengewichtsmauer); (B) Gewölbesperre (Bogenmauer)

enge Felsprofile. Die prinzipiellen Unterschiede sind in Bild 133 dargestellt.

Nach der Form von Gewölbemauern (Bogenstau-mauern) werden diese in Zylindermauern, Gleichwinkelmauern und in freie Mauerformen unterteilt. Letztere finden im Bereich der Wildbachverbauung keine Anwendung. Kennzeichnend für *Zylindermauern* ist ein ungefähr gleicher Krümmungsradius auf allen Mauerhöhen. Der Öffnungswinkel wird zur Basis hin kleiner. Nach *Drobir* [59] kann in einem sehr engen Tal mit fast senkrechten Talflanken mit guter Näherung angenommen werden, dass der Wasserdruck über die Bogenwirkung horizontal zu den Talflanken abgetragen wird. Die *Gleichwinkelmauer* ist unter dem Gesichtspunkt konstruiert, dass der Schnittwinkel der Kämpfertangente mit den

Höhenlinien des Tales in allen Schichten annähernd gleich bleibt. Die typische Gleichwinkelmauer als Talsperre ist im Mittelquerschnitt annähernd senkrecht (Bild 134 B). Wird der Krümmungsradius zur Basis hin kleiner, entsteht im Bogenscheitel ein trapezförmiger Querschnitt, ähnlich wie in Bild 134 A dargestellt.

Leys [135] gibt Vor- und Nachteile von Bogensperren an. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass die Mauer aufgrund der primären Druckbelastung großteils aus unbewehrtem Beton ausgeführt werden kann. Eine Bogenmauer ist gegenüber einer Überbelastung wesentlich robuster als Platten-tragwerke. Durch dünnere Mauerquerschnitte bei normalkraftbeanspruchten Bauteilen kommt es im Vergleich zu biegebeanspruchten Bauteilen zu einer Materialeinsparung. Bei tragfähigem Fels in den Flanken ist die Gewölbemauer eine günstige Bauform. Es ist auch möglich, unsymmetrische Sperren zu konzipieren, wenn die Abfluss-sektion außerhalb der Sperrenmitte liegen soll. *Pasche* [162] nennt als weiteren Vorteil das elastische und monolithische Verhalten der Struktur, welches durch die geringe Eigenmasse und die statische Verbundwirkung hervorgerufen wird. Dieser Umstand führt dazu, dass sich Gewölbemauern auch für erdbebengefährdete Gebiete eignen.

Als Nachteile gibt [135] primär die schwierigere und kostenintensive Bauausführung im Vergleich zu geraden Baukörpern an. Sind die Flanken nicht tragfähig, wie dies bei Rutschhängen, nassen Hängen und generell bei minderwertigem Locker-

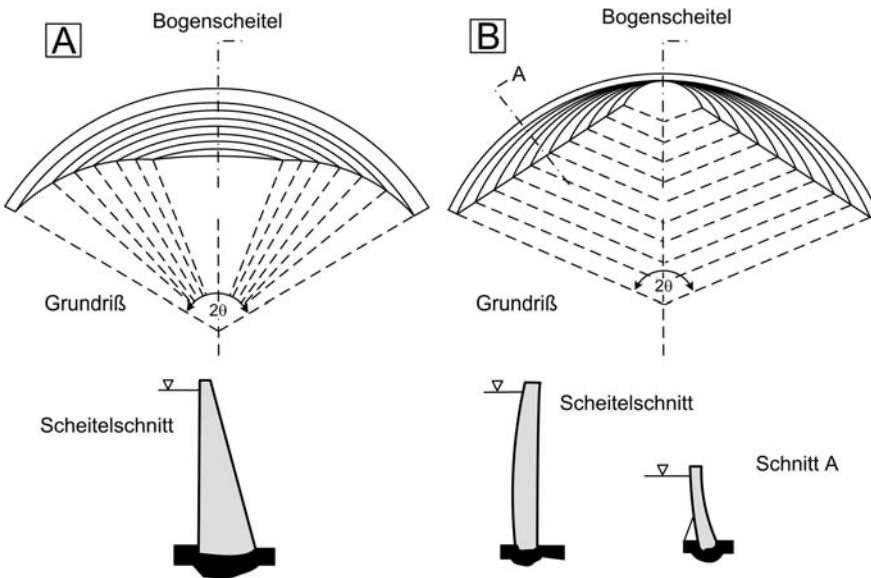


Bild 134. Prinzipielle Formen von Gewölbesperren: (A) Zylindermauer; (B) Gleichwinkelmauer

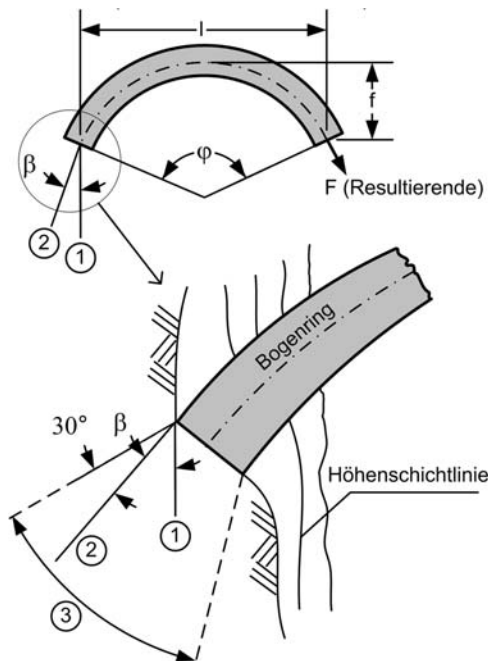
gestein der Fall ist, kann der Kämpferdruck nicht aufgenommen werden. Die bei geringer tragfähigem Boden angeordnete Kämpferverbreiterung erfordert viel Beton und die Einsparung in der Betonmenge durch dünnere Querschnitte im eigentlichen Bogen wird wieder kompensiert.

Für die Berechnung von Bogensperren ist das Steifigkeitsverhältnis Boden (Fels)/Bauwerk sehr wichtig. Besitzen die Widerlager eine geringe Steifigkeit, nähert sich das Tragverhalten des Bogens jenem der Platte. Bei den Spannweiten-/Stich-Verhältnissen (Bild 135) laut Gln. (92) und (93) kann man von einer Bogentragwirkung ausgehen. Nach [135] liegt das günstigste Spannweiten-/Stich-Verhältnis hinsichtlich des Horizontalschubes zwischen 3,5 und 4.

$$l/f \leq 3 \text{ für unbewehrte Mauern} \quad (92)$$

$$l/f \leq 7 \div 10 \text{ für Stahlbetonmauern} \quad (93)$$

Laut [135] sollte der technische und wirtschaftliche Grundsatz im Bogensperrenbau die Suche



- ① Mittlere Richtung der Hörschichtlinien im Kämpferbereich
- ② Kämpfertangente
- ③ Druckausbreitung im Fels (Ausbreitungswinkel 60°)

Bild 135. Kämpferbereich: Winkel zwischen umgebenden Felsen und Kämpfertangente

nach der günstigsten Gewölbewirkung bei geringstem Baustoffverbrauch sein. Um eine günstige Gewölbewirkung zu erzielen, und damit geringe Querschnittsabmessungen zu erhalten und die Druckfestigkeiten des Werkstoffes (Stein, Beton) optimal auszunutzen, muss bei Bogensperren der Krümmungsradius klein und der Öffnungswinkel (Zentriwinkel) groß sein. Höhere Mauerstärken verringern die Elastizität des Sperrkörpers und induzieren größere Biegemomente. Optimal sind daher Bogensperren mit möglichst geringer Mauerstärke. Dadurch kommt es zu einem vorwiegend bogenartigen Lastabtrag über Normalkräfte. Beim Entwurf einer Bogensperre sollte man bei entsprechendem Verhältnis einen möglichst gleichbleibenden Öffnungswinkel und einen kleinen Krümmungsradius anstreben. Wenn aber bedingt durch die Talquerschnittsform, die Radien zur Sohle hin kleiner werden, verlagern sich bei Gleichwinkelmauern die Betonmassen auf die Luftseite. Dadurch können wasserseitig Zugspannungen auftreten. Durch ein Verschieben der Mittelpunkte der Bogenlamellen im unteren Teil der Stauwand gegen die Wasserseite kann dieser Nachteil vermieden werden. Dadurch entsteht eine Doppelkrümmung der Sperrwand.

In der Regel haben Bogensperren einen kreisförmigen Grundriss (Segmentbogen). In der Praxis kommen Öffnungswinkel φ zwischen 60° und 135° vor. Hampel [80] und Jörgensen [111] geben den wirtschaftlichsten Zentriwinkel von Gleichwinkelmauern mit $\varphi \sim 133^\circ$ an. Bei diesem Winkel ergibt sich die größte Materialeinsparung. Wenn dieser Zentriwinkel der einzelnen Bogenlamellen angestrebt wird, muss auch beachtet werden, dass die Kämpfertangente die Höhenlinien der Felshänge in Kronennähe nicht unter einem spitzeren Winkel als $\beta = 40^\circ$ und im übrigen Sperrkörper nicht unter $\beta = 30^\circ$ schneiden sollte (Bild 135). Gestattet die Form des Tales die Einhaltung des Winkels β nicht, müssen die Widerlager am Fels entsprechend ausgearbeitet werden. Durch große Zentriwinkel entsteht der Bogenschub mehr in Tallängsrichtung, wodurch die Querverformung der Hänge vermieden wird. Je kleiner der Halbmesser, je größer die Krümmung und je größer der Zentriwinkel φ , umso geringer der Anteil der Kragträgerwirkung und umso größer die Bogenwirkung.

7.6.1.1 Kämpferverbreiterungen

Überschreiten die Druckspannungen aus der resultierenden Kämpferkraft F den Bemessungswert der aufnehmbaren Bodenspannung, ist es möglich durch eine Kämpferverbreiterung die Spannungen aus dem Kämpfer zu reduzieren. Die Verbreiterung kann kontinuierlich erfolgen oder konsolenartig unmittelbar im Kämpferbe-

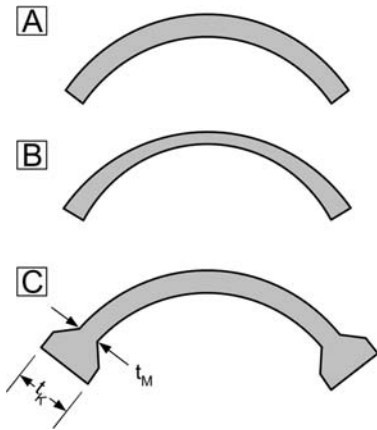


Bild 136. Grundrissformen von Gewölbemauern: (A) konstanter Querschnitt; (B) kontinuierliche Kämpferverbreiterung; (C) konsolenartige Kämpferverbreiterung (betrachtet wird eine Bogenlamelle)

reich (Bild 136). Die erforderliche Verbreiterung der Kämpfer t_K kann nach [135] über die Proportion in Gl. (94) bestimmt werden.

$$\frac{f_{cd}}{f_{bd}} = \frac{t_K}{t_M} \quad (94)$$

mit

f_{cd} Bemessungswert der Druckfestigkeit der Mauer [N/mm²]

f_{bd} Bemessungswert der Bodenpressung [N/mm²]

t_K Mauerstärke im Kämpferbereich [m]

t_M Mauerstärke außerhalb der Kämpferverbreiterung [m]

Leys [135] schlägt vor, die Kämpfermitte in den Drittpunkt des Mauerquerschnittes zu legen. Von diesem Punkt wird die Verbreiterung aufgetragen. Dies ergibt eine Verbreiterung zur Luftseite hin. Zur Einsparung von Betonmasse kann der Lastausbreitungswinkel bis 45° angenommen werden, besser sind 60°. Um einen ausreichenden Schubwiderstand zu erreichen, werden die Ankerköpfe ca. 0,5 bis 1 m parallel zur Sperre gezogen. Danach laufen die Konsolen unter einem Winkel von 15 bis 45° in den Mauerkörper aus. Laut [135] liegen die Winkel in der Praxis an der Wasserseite zwischen 15 und 45° und an der Luftseite zwischen 30 und 45° (Bild 137). Die Einleitung in das Gelände soll annähernd orthogonal erfolgen. Dadurch ergibt sich eine Abstufung in der Sperre entsprechend der angenommenen Bogenlamellen. Ein Beispiel einer Sperre mit konsolenartiger Kämpferverbreiterung ist in Bild 149 dargestellt.

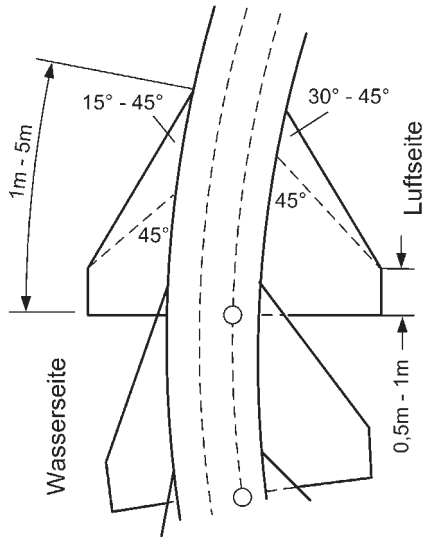


Bild 137. Ausbildung einer konsolenartigen Kämpferverbreiterung: Kämpferköpfe parallel zur Sperrenachse (nach Leys [135])

Kämpferverbreiterungen nach Bild 136 C sind analog einer Konsole nach DIN 1045-1 zu bemessen. Geeignete Stabwerkmodelle zum Nachweis von Konsolen finden sich in Abschnitt 7.9.3.2.

Gewölbesperren sind sehr empfindlich gegen Nachgeben eines Widerlagers. Weicht eine Auflagerseite nach außen aus, entsteht in der Regel in Bogenmitte ein Riss auf der Luftseite im Bereich der größten Zugspannungen. Der erste Riss entsteht an der Stelle des geringsten Querschnittes und führt bei Öffnungen von Dole zu Dole. Ein ähnliches Rissbild entsteht bei Überlastung des Sperrenkörpers, z. B. durch einen Murgang. Wasserseitige Risse entstehen, wenn die Widerlager nach innen (zur Bachachse) geschoben werden. Dies ist bei seitlichem Hangdruck der Fall.

7.6.1.2 Sperrenflügel

Die Sperrenflügel stehen auf dem Sperrenkörper und bilden keine durchgehende Lamelle, da sie durch die Abflussektion unterbrochen sind. Der Bereich der Sperrenflügel über der obersten Bogenlamelle ist gesondert zu bemessen. Dabei sind die maßgebenden Einwirkungskombinationen entsprechend dem funktionalen Sperrentyp anzusetzen. Bestehen Sperrenflügel aus unbewehrtem Beton oder Mauerwerk sind sie wie Gewichtsmauern zu bemessen. Flügel aus Stahlbeton sind nach DIN 1045-1 bzw. EN 1992-1 zu bemessen und über die Bewehrung entsprechend mit dem restlichen Sperrenkörper zu verbinden.

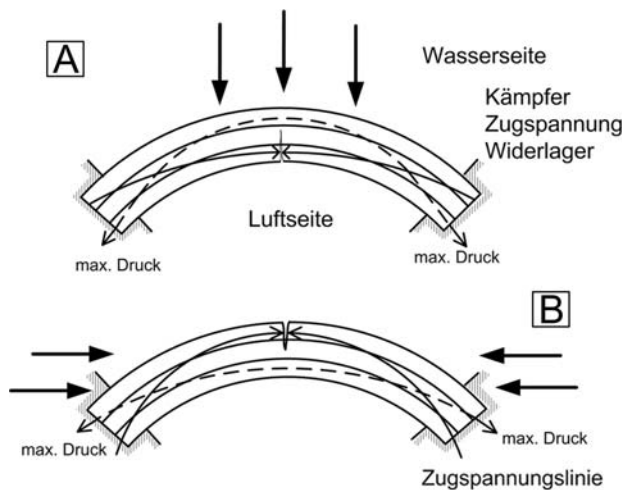


Bild 138. Rissbildung in Bogenmitte: (A) luftseitig bei Ausweichen der Widerlager bei steiler Drucklinie (minimale Stützlinie) durch starke wasserseitige Belastung; (B) wasserseitig bei starken seitlichen Drücken bei flacher Drucklinie (maximale Stützlinie) (nach Leys [135])

7.6.2 Vorbemessung

Die erste Abschätzung der Bauteilabmessung kann nach Pasche [162] über die Ringformel erfolgen.

$$\text{Mittlere Gewölbedicke: } t \geq 2,0 \text{ m} \quad (95)$$

$$\text{Krümmungsradius außen: } r_a = \frac{l}{2 \cdot \sin \alpha}$$

(mit $\alpha = 66^\circ 47'$ entspricht optimalen Öffnungswinkel) (96)

$$\text{Fußdicke: } t_{MB} = \frac{H \cdot \gamma_w \cdot r_a}{\sigma_{c,y} - H \cdot \frac{\gamma_w}{2}}$$

(mit Ringspannung: $\sigma_{c,y} = \frac{3}{4} \cdot f_{cd,red} \approx 4 \div 8 \text{ N/mm}^2$) (97)

Schalendicke am Mauerkopf: $t_{MK} \geq 1 \text{ m und } \leq 0,4 \cdot h$ (98)

7.6.3 Berechnung und Bemessung

Die Bemessungsverfahren für eine Bogensperre können in das Verfahren mit Bogenlamellen, das Verfahren mit Trägerrost und das Verfahren auf Basis der Finiten-Elemente-Methode (FE-Modellierung) eingeteilt werden (Bild 139). Beim *Verfahren mit Bogenlamellen* werden die Lasten nur über die seitlichen Flanken in den Untergrund übertragen. Beim *Verfahren mit Trägerrost* wird zusätzlich eine Übertragung in die Sohle ermöglicht. Dabei werden die Lasten proportional auf die Bogenlamellen und Kragträger aufgeteilt. Das *FE-Modell* unterstellt eine kontinuierliche Bettung, welche entsprechend der Steifigkeitskennwerte des Bodens eingegeben wird. Die FE-Methode ist weitgehend der Trägerrostmethode ähnlich. Nach [59] haben sich in der Praxis das

Trägerrostverfahren und die Methode der finiten Elemente durchgesetzt.

7.6.3.1 Lastfälle und Berechnungsansätze

Gewölbemauern sind je nach funktionalem Typ auf die maßgeblichen Einwirkungskombinationen nach Abschnitt 7.3 zu bemessen. Dabei sollten zusätzlich die im Folgenden genannten Fakten berücksichtigt werden. Neben den direkten Einwirkungen sind gerade bei Gewölbemauern die indirekten, wie Temperatur, Schwinden, Quellen und Zwang zu berücksichtigen.

Die Wirkung des Eigengewichts ist laut Baldia [15] abhängig von der Art der Bauausführung, dabei insbesondere von der Reihenfolge des Auspressens der Arbeitsfuge zwischen den einzelnen Blöcken. Für eine Vorbemessung genügt allerdings die Annahme, dass das Eigengewicht auf die lotrechten Kragträger wirkt.

Die Temperatureinflüsse spielen in einem Gewölbebauwerk eine bedeutende Rolle, weil diese Zugspannungen verursachen können, die nur von einer Bewehrung aufgenommen werden können. Die Betrachtung einer veränderlichen Temperaturverteilung wird herangezogen, wenn diese die übrigen Spannungen negativ beeinflusst. Dies ist der Fall, wenn die Talseite im Winter erwärmt wird und somit an der Wasserseite Zugspannungen entstehen und im Sommer verursacht die wasserseitige Erwärmung einen ungünstigen Einfluss. Der Fall mit der auftretenden Zugspannung an der Wasserseite (Bild 138 B) ist jedoch der ungünstigere, da bei einer eventuellen Rissbildung die eingelegte Bewehrung korrodiert und bei Frost eine Sprengwirkung auftreten kann.

Um Schwindspannungen abzubauen, empfiehlt es sich auch bei kleinen Bogenmauern, in der

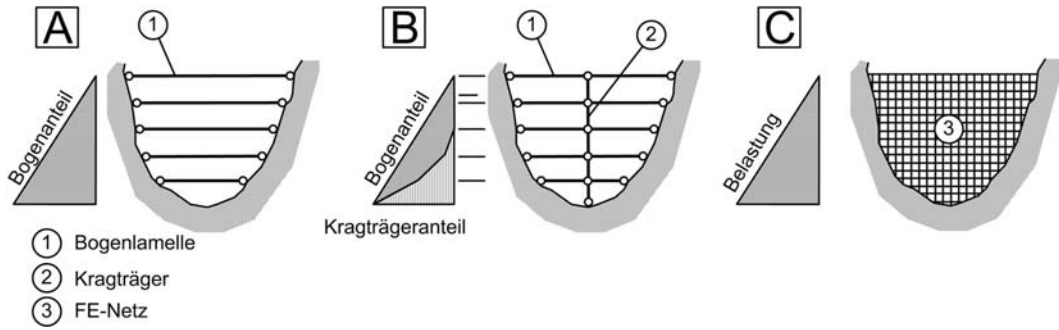


Bild 139. Verfahren zur Berechnung von Gewölbesperren: (A) Verfahren mit Bogenlamellen; (B) Verfahren mit Trägerrost; (C) Verfahren mit FE-Modellierung

Wildbachverbauung offene Blockfugen, welche nachträglich verpresst werden, zu errichten.

Da laut *Baldia* [15] Staumauern wie jede andere elastische Konstruktion zu Schwingungen neigen, ist es notwendig, dass sich die Eigenfrequenz der Sperre von der Frequenz des Untergrundes unterscheidet, damit Resonanzerscheinungen vermieden werden können. Nach *Hohberg et al.* [88] tritt bei Bogenstaumauern ein nichtlineares Verhalten unter Erdbebenwirkung in erster Linie in den vertikalen Blockfugen auf. Durch das Schwingen der Mauer werden die horizontalen Bogendruckkräfte abgebaut und dadurch können sich die Fugen öffnen.

7.6.3.2 Bemessungsverfahren mit Bogenlamellen

Bei diesem Verfahren wird die Sperrenmauer durch zur Gewölbeachse parallele Ebenen in einzelne Bogenlamellen mit einer Breite von 1 m unterteilt. Die so entstandenen Bogenlamellen können jede für sich als 1 m breiter Bogenträger oder vereinfacht mit der Ringformel von *Navier* (Kesselformel) bemessen werden. Bei diesem Verfahren kann nur eine Lastabtragung in den Flanken und nicht in der Sohle berücksichtigt werden.

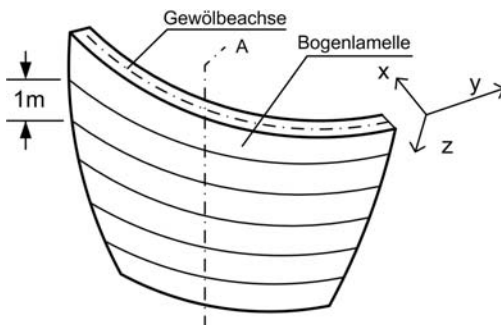
7.6.3.3 Ringformel

Die Ringformel gibt die Spannungen in durch Gleichlast belasteten rotationssymmetrischen Körpern mit konstantem Radius an. Sie beruht als Membranspannung auf einem reinen Kräftegleichgewicht. Es sind zur Berechnung der Spannungen keine Verformungsannahmen und Steifigkeitskennwerte erforderlich. Die Ringformel gilt für dünnwandige, gekrümmte Membranen. Von einer dünnwandigen Membran kann man ab einem Verhältnis von Außen- zu Innendurchmesser $< 1,2$ ausgehen. Die resultierende Tangentialspannung $\sigma_{c,y}$ ergibt sich nach Gl. (99), die Längsspannung $\sigma_{c,z}$ nach Gl. (100).

$$\sigma_{c,y} = \frac{p_x \cdot R_m}{t} \quad (99)$$

$$\sigma_{c,z} = \frac{p_x \cdot R_m}{2 \cdot t} \quad (100)$$

Für die Berechnung von Bogenlamellen kann die Ringformel nur als grobe Näherung verwendet werden, da der Grundriss der Bogensperren nicht immer einem Kreis folgt und die Lamellen keinen geschlossenen Ring bilden und in der Regel nicht dünnwandig sind. Zudem geht die Ringformel



Schnitt A

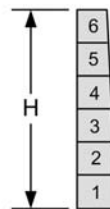


Bild 140. Verfahren mit Bogenlamellen: Aufteilung des Sperrkörpers in einzelne Bogenlamellen mit der Höhe 1 m

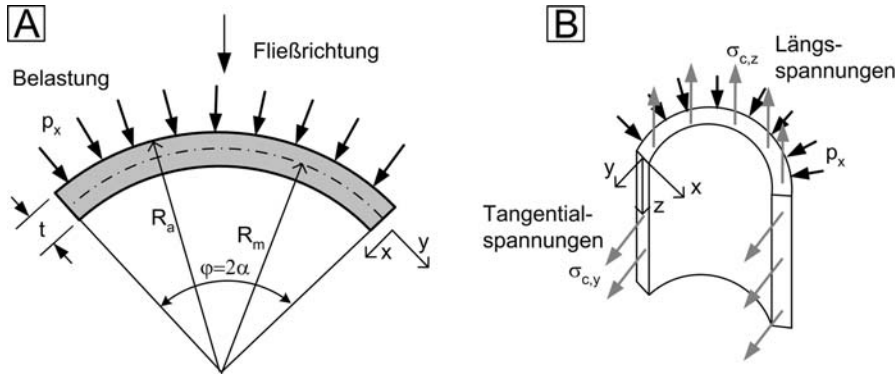


Bild 141. Bogenlamelle: (A) geometrische Größen der Ringformel; (B) Längs- und Tangentialspannungen

von einer gleichmäßig verteilten und zum Mittelpunkt des Kreises wirkenden Belastung aus, wie sie bei ruhendem Wasserdruck vorkommt. Belastungen durch Einzelstöße oder asymmetrische Belastungen können nicht berücksichtigt werden. Es ist auch nicht möglich über die Ringformel die Einspannmomente zu erfassen. Wenn trotzdem in der Wildbachverbauung die Ringformel für die Berechnung von Gewölbesperren Verwendung findet [80, 135], ist es laut Czerny [43] notwendig den Bemessungswert der Druckfestigkeit des Betons $f_{cd,red}$ auf 4 bis 8 N/mm² zu begrenzen. „Die Ringformel vernachlässigt das Eigengewicht, die durch das Eigengewicht herrührenden Randspannungen, die Einwirkung

auf die Bachsohle, Temperatureinwirkungen und Schwingungen durch Hochwasserüberfall“ [135, 245].

Bogenträger

Die Bogenlamellen werden je nach Steifigkeit der Auflager vereinfacht als gelenkig oder eingespannt gelagerter Bogenträger idealisiert. Czerny [43] empfiehlt, um eine bessere Übereinstimmung der Berechnungsannahmen mit den Gegebenheiten zu erreichen, die einzelnen Bogenlamellen als symmetrischen Kreisbogen mit konstanter Bogendicke und beidseitig elastischer Einspannung anzunehmen. Da Bogensperren vorteilhaft

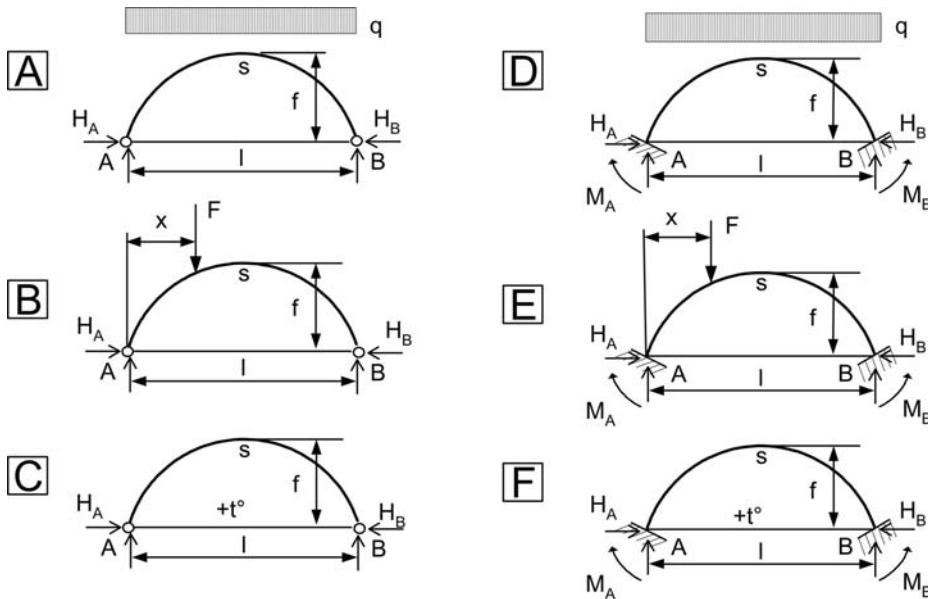


Bild 142. Bogenträger: (A–C) gelenkig gelagert; (D–F) eingespannt

in Fels gegründet werden, kann unter Umständen auch eine Einspannung erfolgen. Im Zweifelsfall ist es zielführend, ähnlich den Plattensperren, beide Extreme der Lagerungsbedingungen zu untersuchen und den Querschnitt auf die Maximalwerte aus beiden zu bemessen. Im Bild 142 sind beispielhaft einige wichtige Belastungssituationen (Gleichlast, Einzellast, Temperaturverformung) angegeben. Die Gleichlast kann näherungsweise für die Bemessung von Wasser- und Erddruck verwendet werden. Über Einzellasten

können Murstöße berücksichtigt werden. Aus der aus der Auflagerreaktion A, B und dem Horizontalschub H_A ermittelten Normalkraft N und dem Biegemoment M_B lassen sich die Randspannungen ermitteln.

7.6.3.4 Bemessungsverfahren mit Trägerrost

Beim Verfahren mit Bogenlamellen können keine Spannungen quer zur Bogenebene und kein Lastabtrag in die Sohle berücksichtigt werden. Beim

Tabelle 45. Auflagerreaktionen der in Bild 135 dargestellten Systeme

| | Auflagerreaktionen | | Auflagerreaktionen |
|---|---|---|---|
| A | $H_A = H_B = \frac{q \cdot l^2}{8f} \cdot \frac{1}{1+k}$ mit $k = \frac{15}{8f^2} \cdot \frac{J_s}{A_s}$ | D | $A = B = \frac{q \cdot l^2}{2}$ $k = \frac{45 J_s}{4f^2 A_s}$ $H_A = H_B = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot f} \cdot \frac{1}{1+k}$ $M_A = M_B = \frac{q \cdot l^2}{12} \cdot \frac{k}{1+k}$ |
| B | $H_A = H_B = \frac{5 \cdot F \cdot l}{8 \cdot f} \cdot \frac{1}{1+k} \left[\frac{x}{l} - 2 \left(\frac{x}{l} \right)^3 + \left(\frac{x}{l} \right)^4 \right]$ $k = \frac{15}{8f^2} \cdot \frac{J_s}{A_s}$ | E | $A = F \left[1 - 3 \left(\frac{x}{l} \right)^2 - 2 \left(\frac{x}{l} \right)^3 \right]$ $B = F \left[3 \left(\frac{x}{l} \right)^2 + 2 \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right]$ $H_A = H_B = \frac{15 F \cdot l}{4 \cdot f} \left[\left(\frac{x}{l} \right) - \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right]^2 \frac{1}{1+k}$ $M_A = \frac{2}{3} H_A \cdot f - F \cdot l \left[\frac{x}{l} - 2 \left(\frac{x}{l} \right)^2 + \left(\frac{x}{l} \right)^3 \right]$ $M_B = \frac{2}{3} H_B \cdot f - F \cdot l \left[\left(\frac{x}{l} \right)^2 + \left(\frac{x}{l} \right)^3 \right]$ |
| C | $H_A = H_B = \frac{15 \cdot E \cdot J_s \cdot \alpha_t \cdot t}{8 \cdot f^2 \cdot (1+k)}$ mit $k = \frac{15}{8f^2} \cdot \frac{J_s}{A_s}$ | F | $A = B = 0$ $k = \frac{45}{4f^2} \cdot \frac{J_s}{A_s}$ $H_A = H_B = \frac{45 \cdot E \cdot J_s \cdot \alpha_t \cdot t}{4 \cdot f^2 \cdot (1+k)}$ $M_A = M_B = \frac{15 \cdot E \cdot J_s \cdot \alpha_t \cdot t}{2 \cdot f \cdot (1+k)}$ |

Die Bogenform ist als Parabel angenommen und der Querschnitt folgt der Bedingung:

$J \cdot \cos \alpha = J_s$

mit

α Neigungswinkel der Bogenachse gegen die Horizontale

J_s Trägheitsmoment im Bogenscheitel S

A_s Querschnittsfläche im Bogenscheitel S

Verfahren mit Trägerrost werden die waagerechten Bogenlamellen durch senkrechte Kragträger zu einem Trägerrost verbunden. Der Trägerrost liegt in den seitlichen Flanken und der Bachsohle auf. Bild 143 A zeigt eine schematische Darstellung eines Trägerrostsystems. In den einzelnen Knoten müssen die Verträglichkeitsbedingungen erfüllt sein. Somit sind die Verformungen der einzelnen Lamellen von den Nachbarlamellen abhängig.

Die Aufteilung der Einwirkungen auf die Bogen- und Kragträgerlamelle erfolgt derart, dass die Verformungen in den Knotenpunkten des Trägerrostes für die Bogen- und Kragträgerlamelle gleich groß sind (Verträglichkeitsbedingung). Die Lastaufteilung kann nach dem Versuchslastverfahren und dem Lastaufteilungsverfahren erfolgen. Beide Methoden gehen auf Ritter zurück. Allen Verfahren gemeinsam ist, dass sie nach Müller [150] die folgenden vier statischen Voraussetzungen erfüllen müssen:

- Die Formänderungseigenschaften des Mauerkörpers müssen sich durch Elastizitätsmoduli und Poissonzahlen ausdrücken lassen (nur möglich, solange der Beton z. B. nicht kriecht).
- Der Sperrenkörper muss in kleine Elemente zerlegt gedacht werden, welche in geometrischer Verträglichkeit und mechanischem Gleichgewicht zueinander stehen.
- Alle Elemente müssen sich so deformieren, dass die Verträglichkeitsbedingungen erfüllt sind.
- Die Spannungen und Verschiebungen müssen auch an den Systemgrenzen die Randbedingungen erfüllen.

In den Kreuzungspunkten von Kragträger und Bogenlamelle kann man die Radial-, Tangential- und Vertikalverformung gleichsetzen. Dadurch ergeben sich sechs Freiheitsgrade. Da bei einer genauen Bemessung eine möglichst große Anzahl an Einzelträgern untersucht werden soll, ergibt sich ein hochgradig statisch unbestimmtes System und eine Vielzahl an linearen Gleichungssystemen. Aus diesem Grund gab man sich nach [59] anfänglich mit dem Ausgleich der Radialverschiebung δ_r , der Tangentialverschiebung δ_t und der Verdrehung um die horizontale tangentielle Achse φ_t zufrieden (Bild 143 B).

Nach Kettner [118] beeinflussen sich die einzelnen Ausgleichselbst. Jeder Ausgleich ruft eine Radial- und Tangentialverschiebung und Verformung hervor. Dies bedeutet, dass die Ausgleichsel mehrmals durchzuführen sind, bis die gewünschte Koinkidenz erreicht ist. Laut [118] wird dies in den meisten Fällen, aufgrund der starken Konvergenz, bereits im zweiten Berechnungsschritt erreicht. Nachdem die Übertragungskräfte auf die beiden

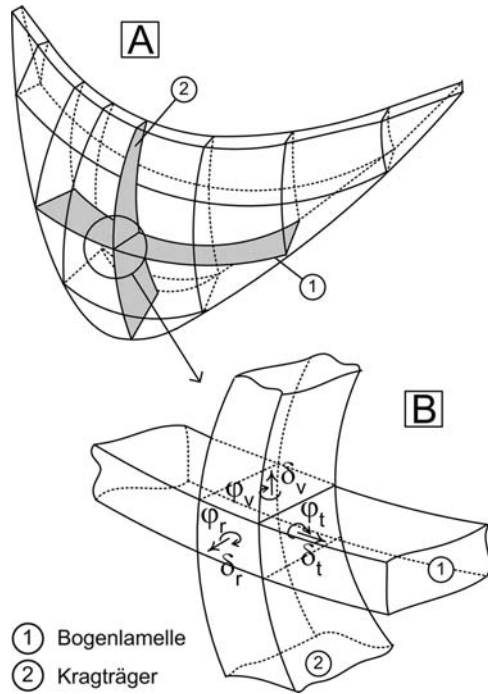


Bild 143. Verfahren mit Trägerrost: (A) schematische Darstellung eines Trägerrostes; (B) Knoten mit den Verformungen (Verschiebung δ , Verdrehung φ)

Tragsysteme aufgeteilt wurden, können getrennt für Bogen- bzw. Kraglamelle die Spannungen ermittelt werden.

Bei der Berechnung der Kragträger werden diese laut Baldia [15] wegen ihrer nur gering von der Vertikalen abweichenden Form als gerade Stäbe angenommen. Die Nachgiebigkeit des Felsens an der Aufstandfläche wird durch eine elastisch nachgiebige Einspannung nachempfunden. Die Schnittgrößen und die Verrückungen werden nach [15] rekursiv berechnet.

Bei den Bogenlamellen handelt es sich um dreifach statisch unbestimmte Systeme. Für die Berechnung werden sie nach [15] an den beiden Kämpfern als elastisch nachgiebig eingespannte, gekrümmte Träger angesehen. Zudem können die Achsen der Bogenlamellen verschiedene Formen haben.

Trägerrostformen

Je nach Talbreite wird der ein- oder mehrschnittige Trägerrost verwendet (Bild 144).

Beim *einschnittigen Trägerrost* findet nur ein Kragträger Verwendung. Dieses Verfahren wird auch

als einschnittiges Lastaufteilungsverfahren bezeichnet. Dabei handelt es sich laut [43] um eine scheinbentheoretische Berechnungsmethode nach Ritter. Hier wird die Sperre in ein System von Bogenlamellen und einem Mittelscheitel-Kragträger zerlegt. Aus den gemeinsamen Durchbiegungen der einzelnen Elemente können die Belastungen (Wasserdruck, Erddruck, ...) auf die Bogenlamellen bzw. auf den Kragträger aufgeteilt werden. Ein Kragträger spannt sich von Bogenlamelle zu Bogenlamelle und ist auf diesen elastisch gelagert. Die Kragträger und die Bogenlamellen sind dabei im Gelände elastisch eingespannt (Bild 144 A).

Nachdem den einzelnen Elementen die zugehörige Lastabtragung zugewiesen wurde, können die Querkraft und die Biegemomente ermittelt werden. Dieses einschnittige Lastaufteilungsverfahren gibt bei kleinen Sperren, wie dies Wildbachsperren sind, einen guten Überblick über die horizontalen und auch vertikalen Spannungsverteilungen. Die Lasten können nach dem Versuchslast- oder Lastaufteilungsverfahren den Systemteilen zugewiesen werden.

Ein *mehrschnittiger Trägerrost* wird bei großen Sperren in einem Tal mit unsymmetrischer Form verwendet. Bei einem komplexen Bauwerk dieser Art sind nach Czerny [43] eingehendere Untersuchungen erforderlich. Hierzu eignet sich das mehrschnittige Lastaufteilungsverfahren (Bild 144 B).

Betrachtet man außer dem Scheitelkragträger weitere Kragträger, welche eine unterschiedliche Biegesteifigkeit aufweisen, ergibt sich laut [43], aufgrund der die Kragträger verbindenden Bogenlamellen, eine sehr viel genauere Aufteilung der Belastungen. Durch diese genauere Aufteilung der Lasten kann ein genaueres Spannungsbild über das gesamte Bauwerk gegeben werden. Die Anwendung dieses Verfahrens ist nach [43] aber nur bei großen Bogenstaumauern im Kraftwasserbau nötig und üblich.

Verfahren zur Lastaufteilung

Das *Versuchslastverfahren* beruht nach Kettner [118] darauf, dass zu Beginn eine Last angenommen wird, anhand derer die Verformungen in beiden Tragsystemen in den jeweiligen Kreuzungspunkten berechnet und miteinander verglichen werden. In einem weiteren Schritt werden die Übertragungskräfte durch Probieren soweit korrigiert, bis eine ausreichende Koinzidenz in allen Kreuzungspunkten eintritt. Dies gilt nach [118] für den Radial-, den Tangential- und den Torsionsausgleich.

Bei dem *Lastaufteilungsverfahren* besteht nach [118] die Möglichkeit, die Übertragungskräfte aus einem linearen Gleichungssystem (Elastizitätsgleichung) direkt zu ermitteln. Diese Elastizitätsgleichungen können aus der Forderung erstellt werden, dass die Verschiebungen und Verdrehungen in den Kreuzungspunkten der Bogen- und Kragträgerlamellen gleich groß sein müssen. Aus dieser Forderung kann man nach [118] ableiten, dass für jeden Ausgleich (Radial-, Tangential- und Torsionsausgleich) so viele Gleichungen mit derselben Anzahl an Unbekannten vorhanden sind wie Kreuzungspunkte. Die Lösungswerte dieser Gleichungen entsprechen den gesuchten Übertragungskräften.

Näherungsweise kann die Lastaufteilung der Wasserkraft auf die Bogenlamellen und die Kragträger nach Ritter durchgeführt werden (Bild 145). Dabei ist nach Czerny [43] zu erkennen, dass im oberen Bereich der Sperre die Lasten zum Großteil von den Bogenlamellen aufgenommen werden. Im unteren Teil werden die Lasten dann immer mehr von den Kragträgern übernommen. Diese Aufteilung beruht auf der Tatsache, dass der Kragträger im oberen Bereich zu weich ist, um Lasten aufnehmen zu können. Mit dem Einspannmoment und der Normalkraft aus dem Eigengewicht kann man sich das Biegemoment an der Einspannstelle berechnen. Dabei können wasserseitig Biegezugspannungen auftreten.

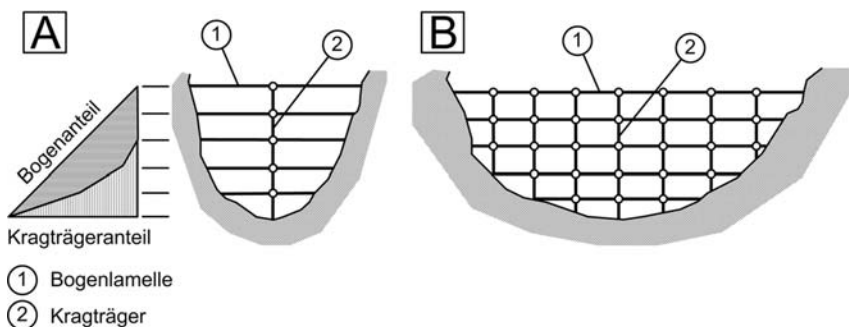


Bild 144. Trägerrostformen: (A) einschnittiger Trägerrost; (B) mehrschnittiger Trägerrost

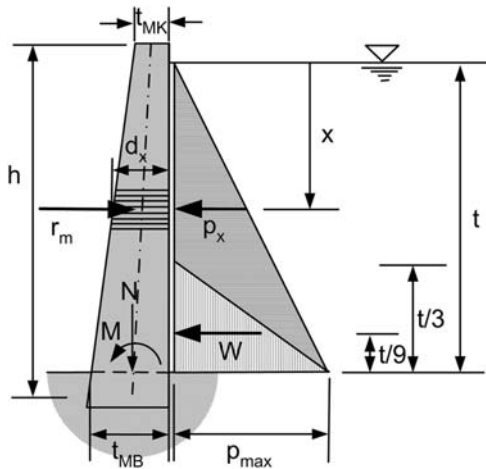


Bild 145. Lastaufteilungsverfahren (nach Ritter, aus Czerny [43])

Die resultierende Wasserlast W des Kragträgers berechnet sich nach Gl. (101). Die maximale horizontale Wasserlast p_{\max} errechnet sich nach Gl. (102), das untere Einspannmoment aus der Wasserlast des Kragträgers nach Gl. (103).

$$W = \frac{\gamma_w \cdot t^2}{6} \quad (101)$$

$$p_{\max} = \gamma_w \cdot t \quad (102)$$

$$M = \frac{\gamma_w \cdot t^3}{54} \quad (103)$$

7.6.3.5 Verfahren mit FE-Methode

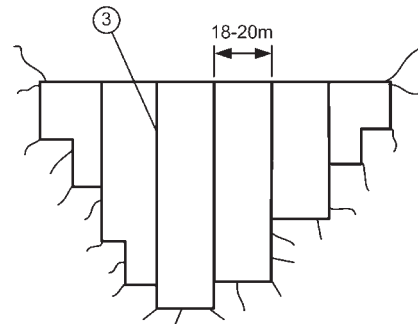
Der bedeutendste Vorteil der Methode der finiten Elemente ist die Möglichkeit einer weitgehend realitätsnahen Simulation der tatsächlich vorliegenden Gegebenheiten im Hinblick auf die Geometrie und die Stoffgesetze. Eine weitere nicht zu vernachlässigende Stärke ist die fast unbegrenzte Möglichkeit die Parameter zu variieren, wobei sowohl das Material- als auch das Geometrieverhalten nichtlinear angesetzt werden kann.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, mit der Methode der finiten Elemente einen ausreichend großen Teil des umgebenden Felsens zu erfassen. Somit ist der gesamte Komplex – Felsen und Sperre – in einem einheitlichen Rechenmodell erfasst. Die Mauer wird in eine Vielzahl von Einzellelementen geteilt, welche über Verträglichkeitsbedingungen miteinander gekoppelt sind und in den Knoten Kräfte und Momente übertragen können. Nach Drobriz [59] verwendet man

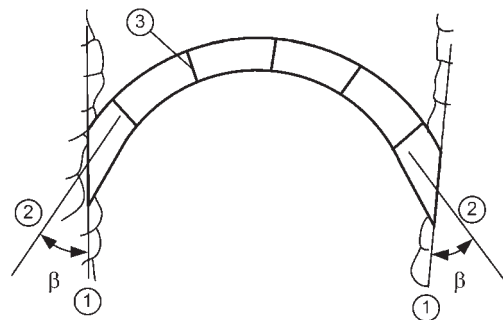
zur Modellierung einer dünnen Mauer Schalenelemente. Dicke Mauern werden durch räumliche Elemente erfasst.

Die Traglastberechnung wird nach Pomper [169] in Form einer elastoplastischen Finite-Elemente-Modellierung durchgeführt. Pomper spricht von einem elastoplastischen Verhalten, da der anfänglich elastische Zustand von plastischen Verformungen ab der Überschreitung einer gewissen Spannungskonzentration überlagert wird. Dieses Spannungsniveau ist abhängig von bereits vorhandenen plastischen Verformungszuständen. Das plastische Verhalten ist damit durch irreversible Dehnungszustände gekennzeichnet.

Laut [169] beginnt die Tragwerksanalyse mit der Elementierung der Sperre. Die unterschiedlichen Elementtypen und deren Eigenschaften haben Auswirkungen auf die Geometrie und die Rechenergebnisse und damit legen die Elementtypen auch die Eigenschaften für spätere Anforderungen fest. Zu den wichtigsten Eigenschaften zählen:



Grundriss



- ① Mittlere Richtung der Höhengschichtlinien im Kämpferbereich
- ② Kämpfertangente
- ③ Vertikale Blockfuge

Bild 146. Anordnung von Blockfugen

- Volumenformen, welche durch einen möglichst vollständigen Polynomansatz gekennzeichnet sind;
- Hexaeder, Pentaeder und Tetraederformen müssen möglich sein;
- eine möglichst genaue Darstellung der Sperrenoberfläche, sei es an den Elementrändern, wie auch an der Sperrenoberfläche;
- Abstimmung der Integrationsordnung auf die Ansatzfunktionen, damit „Wackeleffekte“ verhindert werden.

Die Projektierung einer Talsperre gliedert sich laut [169] in den tatsächlichen Sperrenentwurf – das ist die Festlegung der Parameter der geometrischen Form – und in die Umsetzung in das Berechnungsnetz. Von vielen Autoren wird die Mittelfläche der Sperre als Bezug vorgeschlagen.

7.6.4 Konstruktive Durchbildung

Die Durchbildung von Beton- und Stahlbetontragwerken hat nach DIN 1045-1 bzw. EN 1992-1 zu erfolgen. Bei der Anordnung von Arbeits- oder Bewegungsfugen sind die Angaben aus Abschnitt 4.9.7 zu beachten.

7.6.4.1 Blockfugen

In Hinsicht auf die Bauausführung ist nach *Pasche* [162] anzumerken, dass obwohl im Vergleich zu Gewichtsmauern sehr schlanke Bauwerke entstehen, beim Betoniervorgang noch so viel Abbindewärme entwickelt wird, dass eine gestaffelte Bauweise in Betonblöcken erforderlich ist (Bild 146). Zur Herstellung des Verbundes werden die Betonblöcke trapezförmig verzahnt und mit einem Fugenband abgedichtet. Die Arbeitsfugen

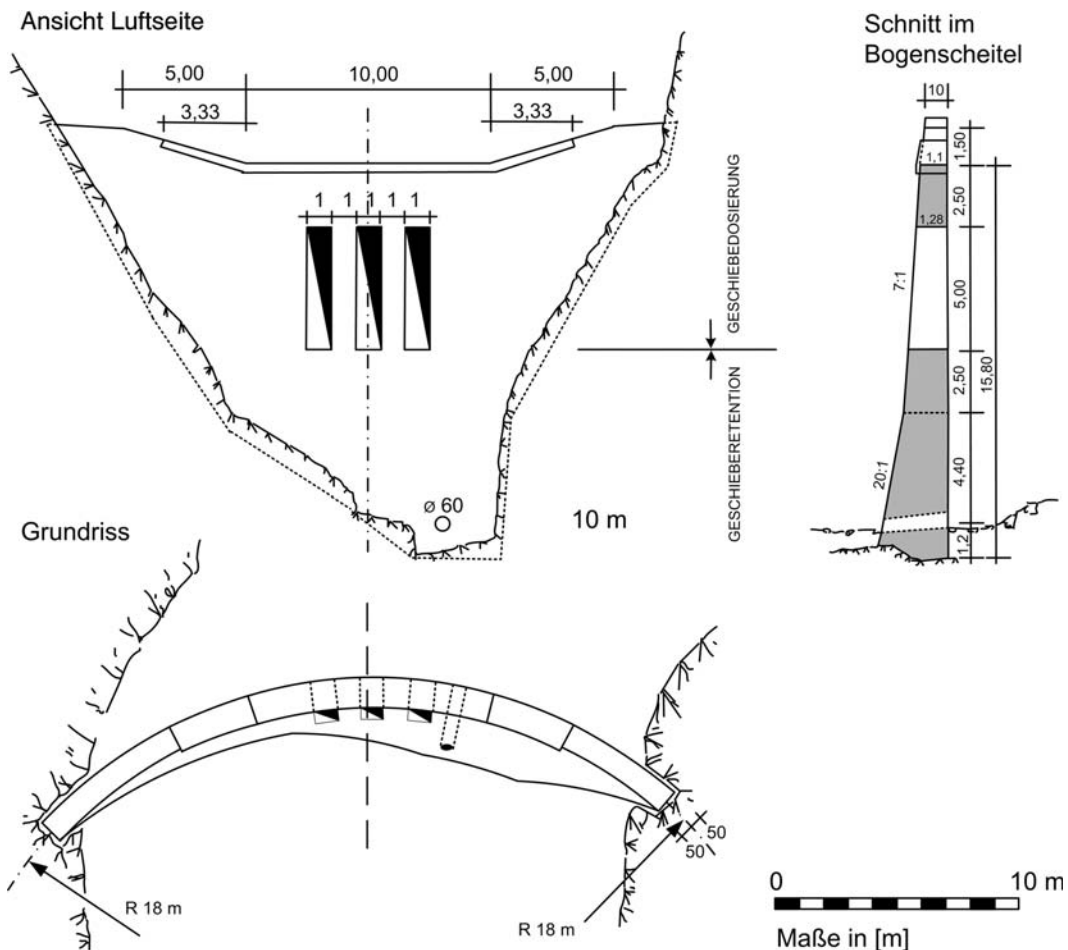
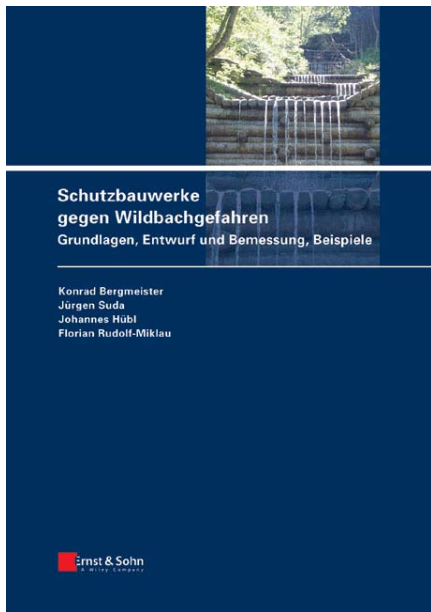


Bild 147. Gewölbesperre



Bergmeister, K. et al.

Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren

Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele

Die Wildbachverbauung umfasst die Gesamtheit aller Maßnahmen, die in oder an einem Wildbach oder in seinem Einzugsgebiet ausgeführt werden, um insbesondere das Bachbett und die angrenzenden Hänge zu sichern, Hochwasser und Feststoffe schadlos abzuführen und die Wirkung von Hochwasserereignissen auf ein zumutbares Ausmaß zu senken. Dazu gehören die Unterbindung der Geschiebebildung und der Rückhalt von Verwitterungsprodukten, die Verbesserung des Wasserhaushalts und die unschädliche Ableitung von Wasser und Geschiebe in Wildbacheinzugsgebieten, die Beruhigung und Begrünung von Bruch- und Rutschungsflächen, Maßnahmen, die der drohenden Entstehung von Runsen und Rutschungen entgegenwirken sowie die Betreuung und Instandhaltung der Wildbacheinzugsgebiete.

Die Konzeption und Bemessung von Schutzbauwerken stellt besondere Anforderungen an den Planer und erfordert umfassende Kenntnisse der in den Einzugs- und Risikogebieten ablaufenden Prozesse. Technische Standards für die Planung und Ausführung sind nur lückenhaft vorhanden. Außerdem finden die einschlägigen Normen der Hydrologie, des Wasserbaus, des konstruktiven Betonbaus und der Geotechnik Anwendung. In diesem Buch werden die wichtigsten Grundlagen und Regeln für die Planung, Konstruktion, Bemessung und Errichtung von Schutzbauwerken der Wildbachverbauung zusammengefasst. Es gibt einen Überblick über die grundlegenden Wildbachprozesse und die davon ausgehenden Einwirkungen, enthält eine funktionale und konstruktive Systematik der Schutzbauwerke, stellt die hydrologischen, hydraulischen und statischen Grundlagen des Entwurfs und der Bemessung dar, fasst die wichtigsten Bautypen, ihre Bauteile und Funktionsorgane zusammen und enthält ausgeführte Beispiele. (IX, 211 Seiten, 193 Abb., 50 Tab.. Gebunden. Erschienen)

Aus dem Inhalt:

- EINFÜHRUNG
- WILDBACHSYSTEMATIK
- ENTWURF UND KONSTRUKTION VON SCHUTZBAUWERKEN
- BEMESSUNGS- UND BERECHNUNGSGRUNDLAGEN
- HYDRAULISCHE BEMESSUNG
- STATISCHE BERECHNUNG UND BEMESSUNG
- ERHALTUNG UND LEBENSDAUER VON SCHUTZBAUWERKEN
- LITERATUR

Link Online-Bestellung **per Fax bestellen +49(0)30 47031 240**

| Anzahl | Bestell-Nr. | Titel | Einzelpreis |
|--------|-------------------|--|-------------|
| | 978-3-433-02945-9 | Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren | € 49,90 |
| | 904852 | Gesamtverzeichnis Verlag Ernst & Sohn | kostenlos |
| | 2093 | 1 Probeheft Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau | kostenlos |

Liefer- und Rechnungsanschrift: privat geschäftlich **Bestell-Code: 100 773**

| | | | |
|-----------------------|---|---------|-----|
| Firma | | | |
| Ansprechpartner | | Telefon | |
| UST-ID Nr./VAT-ID No. | | Fax | |
| Straße/Nr. | | E-Mail | |
| Land | - | PLZ | Ort |

Wilhelm Ernst & Sohn
 Verlag für Architektur und
 technische Wissenschaften GmbH & Co. KG
 Rotherstraße 21
 10245 Berlin
 Deutschland
 www.ernst-und-sohn.de



Datum/Unterschrift



*€-Preise gelten ausschließlich in Deutschland. Alle Preise enthalten die gesetzliche Mehrwertsteuer. Die Lieferung erfolgt zuzüglich Versandkosten. Es gelten die Lieferungs- und Zahlungsbedingungen des Verlages. Irrtum und Änderungen vorbehalten.
 Stand: 04.05.09 (homepage_Leseprobe)