

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 71 (1953)
Heft: 38

Artikel: Einige Betrachtungen über Bogenstaumauern
Autor: Kaech, A. / Lombardi, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-60623>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Einige Betrachtungen über Bogenstaumauern

Von Ing. Dr. A. KAECH und Ing. J. LOMBARDI, Bern

Kühnheitsziffer

Feststellungen über die grosse Entwicklung, welche die Konstruktion der Bogenstaumauern in den letzten Jahrzehnten erfahren hat, gehören heute zu den Gemeinplätzen der technischen Literatur. Die dabei angestellten Vergleiche und die Würdigung der verschiedenen Objekte beruhen aber nicht auf allgemein gültigen Prinzipien. Es liegen hier ähnliche Verhältnisse vor, wie sie während langer Zeit auch im Brückenbau herrschten, als für die «Grösse» oder «Wichtigkeit» einer Brücke nur ihre Spannweite als massgebend betrachtet wurde und sich mit diesem Begriff mehr oder weniger unbewusst der Grad der Kühnheit verband. Es schien die Ueberbrückung einer «grossen» Spannweite schon an sich und allein ein gewagtes Bauwerk zu verlangen und zu rechtfertigen. Dieses Kriterium vermochte aber nur bei Balkenbrücken ein einigermaßen richtiges Bild der Verhältnisse zu geben, weil bei Bogenbrücken nicht nur grosse Spannweiten, sondern auch geringe Pfeilhöhen dem Konstrukteur Schwierigkeiten bereiten und ihn zu kühneren, «gespannteren» Bogen führen. Diese Bemerkungen gelten natürlich auch für Hängebrücken. Mit der Einführung der «Kühnheitsziffer» ist es dann gelungen, für die Beurteilung bessere Grundlagen dadurch zu schaffen, dass nicht nur die Spannweite, sondern auch die Pfeilhöhe zur Charakterisierung der Kühnheit eines Bogens herangezogen wurde. Man bezeichnete als deren Kennziffer den Quotienten des Quadrates der Spannweite zur Pfeilhöhe ($k = l^2/f$, siehe z. B. Aufstellung von Melan).

Selbstverständlich darf einer solchen Ziffer keine übermässige und vor allem keine absolute Bedeutung beigemessen werden; es spielen auch zahlreiche andere Umstände bei der Bewertung einer Brücke eine wichtige Rolle. Nichtsdestoweniger muss man zugeben, dass es gelungen ist, mit dieser Kühnheitsziffer in sehr einfacher Weise ein anschauliches Kriterium aufzustellen, das für Ingenieure wertvoll ist, die sich mit diesen Fragen beschäftigen. Wir brauchen hier auch kaum näher auszuführen, dass diese Ziffer ein Mass für den Krümmungsradius des Bogens im Scheitel ist, und dass sie folglich auch die durch das Eigengewicht des Bogens im Scheitel erzeugte Spannung einigermaßen wiedergibt.

Ähnlich, aber naturgemäss etwas komplizierter als bei Bogenbrücken, ist die Sachlage, wenn Bogenstaumauern miteinander verglichen werden, um die Kühnheit ihrer Konstruktion zu beurteilen. Die Schwierigkeit liegt, präziser ausgedrückt, in der Aufstellung eines Kriteriums, das eine numerische Erfassung dieser Eigenschaft ermöglicht.

Vorerst ist festzustellen, dass es widersinnig ist, Bogenstaumauern allein nach ihrer Höhe einzuordnen und zu bewerten, ja zu bewundern, wie es oft geschieht. Diese Bewertung mag für Gewichtsstaumauern angängig sein, wobei sich allerdings die Frage stellen lässt, ob bei einer Gewichtsmauer üblicher Bauweise überhaupt von Kühnheit die Rede sein kann. Anders ist es bei Bogenstaumauern, weil hier der Höhe der Mauer über Fundament nur die Rolle eines Faktors unter anderen zukommt. Von dieser Tatsache ausgehend ist nun für Bogenstaumauern ein Kennzeichen aufzustellen, das zwar weder auf unbeschränkte Geltung noch auf vollständige mathematische Genauigkeit Anspruch haben kann, jedoch ein zuverlässigeres Bild über die «Kühnheit» dieses Sperrtyps vermitteln soll, als es die maximale Mauerhöhe bis jetzt gegeben hat. Um brauchbar zu sein, muss dieses Kriterium bestimmten Anforderungen genügen. In erster Linie muss die entsprechende Kennziffer in einfacher Weise und ohne grosse Rechnungen ermittelt werden können; dann muss sie so weit als möglich von augenscheinlichen Zufälligkeiten unbeeinflusst bleiben, und schliesslich soll sie ein Gesamtbild geben und somit nicht auf Lokal-, sondern auf Integralwerten beruhen.

Zuerst wurde überlegt, ob durch Vergleiche der maximalen oder einer mittleren Druckspannung das Ziel erreichbar sei. Sind grosse Druckspannungen vorhanden, so kann dies auf eine hohe Ausnützung des Materials hindeuten, aber auch ebensogut auf eine unzweckmässige Formgebung. Die-

ses Verfahren ist auch darum unzureichend, weil die maximale Spannung immer nur ein Lokalwert ist und die Bestimmung einer mittleren Spannung verschiedene Schwierigkeiten bietet. Noch wichtiger ist es aber, dass beide Spannungen durch Zufälligkeiten beeinflusst sind; so hängen sie schon von den angewandten Berechnungsmethoden ab, die bei weitem nicht auf einheitlicher Grundlage beruhen. Diese Spannungen genügen also nicht, um einen sichern Schluss auf das gesamte Bauobjekt zu ziehen und verschiedene Objekte auf dieser Basis zu vergleichen.

Ferner haben wir die Möglichkeit untersucht, den Umstand zu berücksichtigen, dass bezüglich der Kühnheit neben der Höhe der Mauer — die den spezifischen Wasserdruck bewirkt — auch die Talbreite — welche die Spannweite der Bogen, also auch ihre Radien bestimmt — und ferner die Dicke der Mauer eine entscheidende Rolle spielen. Damit lag es auf der Hand, die Kühnheitsziffer der Mauer im Verhältnis der Höhe und der Talbreite sowie im umgekehrten Verhältnis der Mauerdicke anzusetzen, was sich analytisch wie folgt ausdrückt:

$$(1) \quad k = HB/D$$

Aber auch diese Definition kann nicht vollständig befriedigen. Einerseits hat sie den Nachteil, dass ihre Berechnung nicht eindeutig ist; die Höhe der Mauer und gewöhnlich auch die Talbreite könnten zwar in einfacher Weise definiert werden; hingegen ist bei den im allgemeinen sehr stark veränderlichen Dicken von Bogenmauern die Ermittlung eines entsprechenden Mittelwertes nicht ohne weiteres möglich. Ferner wäre dieses Vorgehen auch zu willkürlich, denn eine tiefe, schmale und mit Leichtigkeit zu füllende Erosionsrinne in der Talsohle würde die Staumauer viel höher erscheinen lassen, als sie statisch ist; ähnliche Ueberlegungen gelten natürlich ebensogut auch bei der Bestimmung des numerischen Wertes der Talbreite.

Aus diesen Feststellungen ergibt sich die Notwendigkeit, das Problem von einem höhern Gesichtspunkt aus zu betrachten. Deshalb haben wir versucht, die Kühnheit des Bauwerkes mit einer möglichst guten Ausnützung des Materials zu verbinden. Entsprechend einem Oekonomieprinzip kann die geleistete «Widerstandsarbeit mit dem Aufwand in Beziehung gebracht» und aus diesem Verhältnis das gesuchte Kriterium abgeleitet werden.

Als Aufwand lässt sich ohne weiteres die Betonkubatur (V) der Mauer in Rechnung stellen. Zur Ermittlung der geleisteten Arbeit gegenüber etwa dem Wasserdruck allein ist noch folgende Nebenbemerkung zu machen: Es ist hier selbstverständlich nicht gegeben, auf grosse mathematische Genauigkeit abzielen, sondern es handelt sich eher darum, unter Vernachlässigung verschiedener Nebenumstände zu einem einfachen, anschaulichen Ergebnis zu gelangen, das die eingangs aufgestellten Erfordernisse erfüllt. Davon ausgehend, dass bei einer Bogenmauer von den verschiedenen Wirkungen die Bogenwirkung die weitaus grösste sein muss, denn sonst müsste von einer gekrümmten Gewichtsmauer die Rede sein, werden wir diese Wirkung allein berücksichtigen, d. h. Biege-, Drillungs- und Schubwirkung beiseite lassen.

Betrachten wir nun das Bild 1, das eine «abgewinkelte» Mauermittefläche sowie einen Bogen darstellt. In der Tiefe x

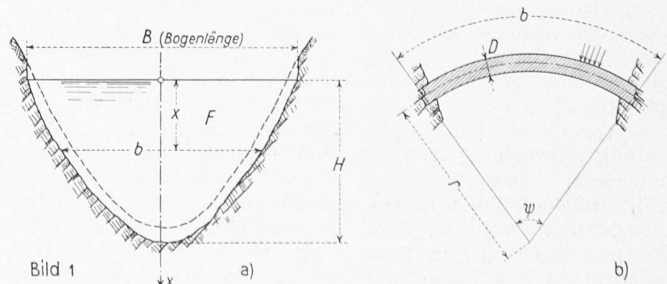


Bild 1

wirkt auf den Bogen ein Wasserdruck von γx . Die reine Ringkraft in einem Bogen von der Höhe dx ist $dN = \gamma x r dx$, wenn r der Krümmungsradius des Bogens ist. Wir sehen hier davon ab, dass der auf die Bogenaxe bezogene Wasserdruck spezifisch etwas grösser wäre als derjenige auf die Wasserleitung der Mauer. Die Kraft dN wird auf eine Länge $b = r\psi$ nach den Widerlagern abgeleitet; somit ist die entsprechende «Arbeit»:

$$dA = \gamma b x r dx = \gamma \frac{b^2}{\psi} x dx$$

Integriert man über die ganze Höhe der Mauer, so ergibt sich:

$$A = \int_{x=0}^{x=H} \gamma \frac{b^2}{\psi} x dx$$

Die praktische Auswertung dieses Integrals bietet zwar keine Schwierigkeit; sie erfordert aber ein bedeutendes Mass an Rechenarbeit, und es ist in Anbetracht der gemachten Vereinfachungen gerechtfertigt, sich mit einer Schätzung zu begnügen.

Erinnern wir uns daran, dass zur Verminderung von Nebenspannungen und zur Erreichung optimaler Ausnützung des Materials die Winkelöffnungen der Bogen möglichst nahe an etwa 120° gewählt werden müssen, und dass somit eine gute Bogenmauer sich möglichst dem Idealbild der sogenannten Gleichwinkelmauer nähert, so dürfen wir unter dem Integralzeichen den Öffnungswinkel als konstant annehmen und überhaupt fallen lassen, da es sich ja um einen Vergleich zwischen verschiedenen Mauern handelt. Nach dem Mittelwertsatz der Integralrechnung lässt sich also der Integralwert wie folgt angeben:

$$A \cong \gamma \int_{x=0}^{x=H} b^2 x dx \cong \gamma (b x)_{\text{mitt}} \int_{x=0}^{x=H} b dx = (b x)_{\text{mitt}} F$$

und es ist klar, dass das verbleibende Integral gleich dem Flächeninhalt der abgewinkelten Mittelfläche der Mauer ist (F).

Sehen wir von einem Formfaktor ab, so können wir den Ausdruck $(b x)_{\text{mitt}}$ wiederum mit F abschätzen. Dieses Vorgehen ist hier mit relativ guter Genauigkeit statthaft, denn alle nur zu wünschenden Regelmässigkeitsbedingungen über den Integranden sind erfüllt. Damit ergibt sich schliesslich als Mass für die definierte «Widerstandsarbeit» der Ausdruck:

$$(2) \quad A = \gamma F^2$$

der tatsächlich die Dimension einer Arbeit aufweist. (Dabei dürfen wir selbstverständlich das konstante spezifische Wassergewicht γ weglassen.) Diesen Wert haben wir unter der Voraussetzung einer reinen Bogenwirkung abgeleitet, und es liegt nahe zu denken, dass er sich infolgedessen nicht für die Anwendung auf Bogengewichtsmauern eignen würde. Tatsächlich sieht man jedoch leicht ein, dass der numerische Wert der Formel (2) praktisch sich kaum ändern würde, wenn alle Mauerwirkungen in Betracht gezogen worden wären, denn es müssten dann zu einem reduzierten Bogenanteil die Anteile der andern Wirkungen addiert werden. Man darf somit sagen, dass, obgleich der Ausdruck (2) auf einer reinen Bogenwirkung beruht, er doch einen Wert darstellt, der einer zu leistenden Arbeit entspricht und somit in weitem Masse von der Mauerform unabhängig ist.

Die Anwendung obiger Ausführungen gibt also endlich folgenden Ausdruck für die Kühnheit:

$$(3) \quad k = A/V \cong F^2/V$$

In Wirklichkeit ging diese Untersuchung dahin, die Bogenmauern über die entsprechenden Gleichwinkelmauern (Jörgensen-Form) mit reiner Ringbogenwirkung miteinander zu vergleichen. Dem Leser wird es wohl bewusst geworden sein, dass der einfache Aufbau dieser Formel nur unter Verzicht auf mathematische Strenge erreicht werden konnte. Dass diese Definition der Kühnheit trotzdem befriedigend und vernünftig ist, geht aus folgenden Betrachtungen hervor:

Vorerst sei festgestellt, dass die beiden ersten Ansätze in enger Beziehung zum Ausdruck (3) stehen. So genügt es einerseits in der Formel (1), den Wert HB als Mass für die Mittelfläche F aufzufassen und die Dicke D als Quotienten der Mauer kubatur zu dieser Mittelfläche zu definieren, um auf die Form (3) zurückzukommen. Andererseits kann (1) auch als Bild für eine Ringspannung der Bogenmauer ange-

sehen werden, stellt doch H ein Mass für den spezifischen Wasserdruck und B , bei den gemachten Voraussetzungen, ein solches für den Krümmungsradius dar; somit bedeutet HB eine spezifische Ringkraft, die durch die Dicke D dividiert eine Ringspannung liefert.

Das beste Mittel zur Beurteilung dieses Kriteriums bietet wohl seine Anwendung auf eine Anzahl Mauern und die vergleichende Betrachtung der Ergebnisse. Leider waren wir nicht in der Lage, von einzelnen bedeutenden Bauwerken rechtzeitig die nötigen Angaben zu erhalten (z. B. Tigne, Pacoima, Schöllenen, Sta. Giustina, Forte Buso, Travignolo, Castillon, Bort, Castelo do Bode und andere). Auch beruhten die zur Verfügung stehenden Zahlenwerte nicht auf einheitlicher Basis; so enthielten die Betonkubaturen manchmal diejenigen allfälliger Widerlager, und manchmal waren diese abgesondert. Auch waren die abgewinkelten Mauerflächen auf die Wasserleitung der Mauer, die Mittelfläche oder gar auf die luftseitige Leibung bezogen. Diese Unstimmigkeiten verwischen das Bild etwas, sodass wir uns damit begnügen müssen, für die Kühnheit runde Zahlen anzugeben. Tabelle 1 gibt die Reihenfolge wieder, die sich auf Grund des Kriteriums (3) für eine Anzahl von Bogenmauern aufstellen lässt.

Tabelle 1. Kühnheitsziffer verschiedener Staumauern

	h m	k
Luzzone (Projekt)	200	2100
Mauvoisin (Ausführung)	236	2100
Rossdam	165	2000
Luzzone (Projekt)	197	1900
Vajont II (Projekt)	263	1900 [1]
Val Gallina	92	1600 [2]
Stevenson Creek Test Dam (100'-Dam)	30,5	1580 [3]
Pieve di Cadore	112	1400 [4]
Vajont I (Projekt)	208	1400 [1]
Lumiei	136	1400 [5]
Hungry Horse	152	1300
Limbergsperre	120	1150
Rossens	82	970 [6]
Sambuco	122	820
Hierzmansperre	58	760 [7]
Fabrèges	51	750
Hooverdam	223	610 [8]
Stevenson Creek Test Dam (60'-Dam)	18,3	606 [3]
Spitallamm	114	600 [9]
Jogne	52	540 [10]
Valle	61	460 [11]
Pfaffensprung	33	420 [12]
Sautet	125	280 (790) [13]

Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf Veröffentlichungen in der Schweiz. Bauzeitung:

- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| 1 1951, S. 42. | 8 1932, Bd. 99, S. 81. |
| 2 1951, S. 40. | 9 1936, Bd. 107, S. 229 ff. |
| 3 1926, Bd. 87, S. 13. | 10 1919, Bd. 73, S. 107. |
| 4 1951, S. 29. | 11 1951, S. 44. |
| 5 1951, S. 18. | 12 1925, Bd. 86, S. 241. |
| 6 1948, S. 641 ff. | 13 1928, Bd. 91, S. 60. |
| 7 1951, S. 215. | |

Bei der Betrachtung der Tabelle 1 mag zunächst auffallen, dass der Hooverdam trotz seiner grossen Höhe relativ ungünstig abschneidet; diese Tatsache ist jedoch leicht zu verstehen, wenn man bedenkt, dass dieses gewaltige Bauwerk ein Profil aufweist, das demjenigen einer «verstärkten» Gewichtsmauer entspricht. Von den ausgeführten Mauern erweist sich die Ross-Sperre nach ihrer zweiten Erhöhung als die kühnste. Neuere Projekte, wie Luzzone, Vajont und Mauvoisin, reichen nahe an sie heran. Besonders vortreffliche Werte erreichen auch neuere italienische Bogenmauern, was man als selbstverständlich empfindet. Dabei kann auch konstatiert werden, dass trotz z. T. recht verschiedenen topographischen Verhältnissen die Kühnheitsziffern dieser Mauern wenig streuen, was wohl auf eine einheitliche Projektierung schliessen lässt und umgekehrt ein gutes Zeugnis für die obige Definition der Kühnheit ablegt. Es wird wohl nicht verwundern, dass die Sautet-Mauer trotz ihrer beträchtlichen Höhe von 125 m an letzter Stelle der Tabelle steht, denn in dieser engen Schlucht wurde der eigentlichen Bogenmauer ein dicker Betonklotz vorgelagert, der das Profil der Bogenmauer zu einem Gewichtsprofil ergänzt. Wird dieser Block nicht berücksichtigt und wird nur die Kubatur der sogenannten

«voûtes actives» in Rechnung gestellt, so ergibt sich für k ein Wert von 790.

Bei geometrisch ähnlichen Mauern nimmt die Kühnheitsziffer mit der Höhe proportional zu; dies lässt sich z. B. aus dem Vergleich der zwei Projekte für die Vajontmauer ersehen. Aus der Tabelle geht aber auch eindeutig hervor, dass im allgemeinen «kein einfacher Zusammenhang zwischen Höhe und Kühnheit besteht», wie wir früher schon dargelegt haben. So kommt z. B. die Feinheit der Form der Pfaffensprungssperre ganz zum Ausdruck, erreicht doch diese Mauer eine Kühnheit von 420 mit einer Höhe von nur 33 m. Die gleiche Bemerkung gilt natürlich in noch stärkerem Mass für die Versuchsmauer am Stevenson Creek, die ihrem Zweck entsprechend besonders dünn gehalten wurde. Es ist bemerkenswert, dass die bloss 18,3 m hohe Stevenson-Creek-Sperre die gleiche Kühnheit aufweist wie die zwölfmal höhere Hoover-Sperre. Diese Tatsache ist verständlich, wenn man bedenkt, dass bei beiden Mauern die horizontalen Druckspannungen etwa gleich gross sind.

Zusammenfassend können wir sagen, dass im grossen gesehen die aufgestellte Rangordnung in Tabelle 1 ganz dem Empfinden des im Talsperrenbau erfahrenen Ingenieurs entspricht.

Der Sinn unserer Untersuchung wäre völlig missverstanden, wenn der Eindruck aufkäme, wir hätten versucht, Rekorde herauszukehren. Jedem Ingenieur wird es einleuchten, dass diese Kühnheitsziffer nur ein Bewertungsfaktor unter vielen andern sein kann, und dass die Kühnheit einer projektierten Mauer sich immer wieder den örtlichen Gegebenheiten in individueller Weise anzupassen hat. So ist es verständlich, dass z. B. bei der Hooversperre der durch den enormen Beckeninhalte gerechtfertigte Wunsch nach «möglichst grosser» Sicherheit, bei der Sperre Rossens die Grösse der Bodenverformungen und bei der Sambuco-Mauer die Schwierigkeiten der Beschaffung geeigneter Zuschlagsstoffe zu Mauern mittlerer Kühnheit geführt haben. Nichtsdestoweniger bleibt aber die Zahl k interessant, denn sie erlaubt, wertvolle Vergleiche zwischen Bogenmauern besonders im Laufe der Projektierung anzustellen.

Im Bewusstsein, mehr oder weniger Bekanntes zu wiederholen, schliessen wir diesen Betrachtungen noch einige Bemerkungen an über Umstände, die bei einer Bogenmauer eine Rolle spielen.

1. Statik

Der statische Effekt einer Staumauer besteht darin, die Wasserlast nach dem Fundament abzuleiten. Bei der statischen Berechnung wird angenommen, dass die Ableitung dieser Kraft grundsätzlich in zwei Richtungen erfolge, nämlich in senkrechter Richtung nach der Sohle und in waagrechtlicher Richtung nach den Flanken des Tales. Von dieser Hypothese ausgehend hat man die Staumauern in drei Klassen eingeteilt: Gewicht-, Bogengewichts- und Bogenmauern. Diese Einteilung beruht auf der unzulänglichen Vorstellung, dass die Gewichtsmauer die Kraft nur nach der Sohle, die Bogenmauer sie nur nach den Flanken und die Bogengewichtsmauer sie in beiden Richtungen übertrage.

Abgesehen von zwei Grenzfällen sind jedoch in Wirklichkeit beide Kraftableitungen gleichzeitig vorhanden. Als erster Grenzfall ist die gerade, aus unabhängigen Blöcken bestehende Gewichtsmauer zu betrachten. Als zweiter Grenzfall kann der theoretische, von Pena Bœuf gemachte Vorschlag einer aus «unabhängigen» Bogen gebildeten Mauer gelten. Mit geschlossenen Fugen ist auch bei einer geraden Gewichtsmauer eine Kraftübertragung durch die Flankenspannung vorhanden. Diese statische Wirkung wird um so grösser, je mehr die Mauer gekrümmt und auch je dünner sie ausgebildet wird, ohne dass jedoch selbst bei den dünnsten Staumauern die Konsolwirkung gänzlich ausgeschaltet werden könnte. Hieraus geht hervor, dass die oben erwähnte Einteilung nicht völlig hinreichend ist und dass man eher von mehr oder weniger dünnen Bogenmauern sprechen sollte. Im folgenden bleiben wir trotzdem bei diesen gewohnten Bezeichnungen, wobei aber den eben gemachten Bemerkungen Beachtung zu schenken ist.

Näher betrachtet ist die statische Wirkung einer Bogenmauer noch komplizierter, denn infolge von Schub und Drillung stellen sich auch schräge Tragrichtungen ein. Die erste Aufgabe der statischen Rechnung ist somit die Bestimmung der Aufteilung des Wasserdruckes zwischen Bogen-, Ge-

wicht- und Torsionswirkung. Auf Einzelheiten dieser Berechnungen kann hier nicht eingetreten werden; wir werden noch kurz darauf zurückkommen und können uns vorläufig mit einigen Bemerkungen allgemeiner Natur begnügen, um so mehr, als gegenwärtig die strenge Erfassung der Beanspruchung dieser verwundenen, in ihrer Dicke veränderlichen Schale bei weitem noch nicht möglich ist. Die grosse Zahl diesbezüglicher theoretischer Abhandlungen, welche zurzeit veröffentlicht werden, zeigt, dass noch viele Probleme ungeklärt sind. Wir verweisen besonders auf folgende: die praktische Erfassung der Schalenwirkung, insbesondere mit Bezug auf die Drillung; die Berücksichtigung von materialbedingten Nebeneinflüssen, wie Schwinden, Schwellen, Kriechen und Plastizität, sowie von äusseren Einwirkungen, wie Temperatur und Erdbeben mit und ohne Dislokation, ferner die Berücksichtigung verschiedener Einzelfragen bei der Nachgiebigkeit des Untergrundes usw.

Die Kompliziertheit der Lastübertragung ist aber nicht nur als nachteilig zu bewerten, sondern diese Vielfalt der statischen Wirkungsweise gibt den Bogenmauern eine grosse Sicherheit, welche bei andern Mauern nicht vorhanden ist. Bei diesem Mauertyp sind deshalb noch grosse Entwicklungen möglich, wofür verschiedene neue Projekte zeugen. Trotzdem sind natürlich auch den Bogenmauern durch folgende Gegebenheiten Grenzen gesetzt: Topographie, Symmetrie der Mauer, Geologie, Betonqualität, Sicherheitsgrad und Wirtschaftlichkeit.

2. Topographie

Die topographische Gegebenheit, d. h. die Form des Tales, ist im wesentlichen durch das Verhältnis Kronenlänge zu Mauerhöhe charakterisiert. Man geht je länger je mehr dazu über, Bogenmauern auch in breiten Tälern zu erstellen. Wenn unter sonst günstigen Umständen dieses Verhältnis den Wert 4 bis gegen 5 erreicht, so findet damit die Anwendbarkeit der Bogenmauer ihre Grenze. Ferner können topographische Besonderheiten, wie ungenügende Widerlager oder zu grosse Einschnitte in die Talflanken, die Errichtung einer Bogenmauer verunmöglichen.

3. Symmetrie der Mauer

Eine in Theorie und Praxis noch stark umstrittene Frage ist diejenige, welche Rolle der Symmetrie des Tales und folglich auch derjenigen der Mauer selbst zukommt. Verschiedene Ingenieure, insbesondere diejenigen der italienischen Schule, sind der Ansicht, dass die Symmetrie des Tales eine Grundbedingung für die Erstellung von Bogenmauern sei, namentlich wenn diese dünn sind; sie scheuen nicht davor zurück, gegebenenfalls grosse Aushübe anzuordnen, um diese Symmetrie künstlich zu erzwingen. Damit beabsichtigen sie, die Entstehung von Drillungsmomenten, besonders im untern Teil der Mauer, auszuschalten. Dieses Vorgehen zur Erreichung einer theoretischen Einfachheit in der Formgebung und Berechnung der Mauer hat schon oft zu unverhältnismässig grossen Ausgaben geführt. Statt mittels dieser Massnahme unbedingt symmetrische Mauern auch in unsymmetrischen Tälern zu projektieren, kann durch eine feinere Einpassung im Gelände und durch Anwendung von verwundenen Schalen der Einfluss der Asymmetrie des Tales teilweise kompensiert werden, vorausgesetzt natürlich, dass diese Asymmetrie nicht über ein bestimmtes Mass hinausgeht. Dies wurde z. B. erreicht bei der Hierzmann-Sperre [7]. Es darf dabei nicht ausser Acht gelassen werden, dass Drillungsmomente auch bei symmetrischen Mauern in symmetrischen Tälern vorkommen, und vor allem, dass die Wirkung der Drillung nicht von vornherein als ungünstig zu bewerten ist. Sie trägt im Gegenteil dazu bei, einen Teil der Last aufzunehmen und nach dem Fundament abzuleiten und somit die Sicherheit der Mauer zu erhöhen.

4. Geologie

Vom geologischen Standpunkt aus ist das Vorhandensein von festen, kompakten Fundamenten und Widerlagern eine unerlässliche Grundbedingung für den Bau einer Bogenmauer; «feste» Widerlager bedeutet jedoch nicht absolut starre Widerlager. Der Fels ist ja immer verformbar, und die Verformbarkeit ist örtlich und zeitlich veränderlich. Jede elastische Verformung ist auch begleitet von einer unelastischen, d. h. einer der Kraft nicht proportionalen und bleibenden Verformung.

Eine zu grosse Nachgiebigkeit des Felsens verunmöglicht den Bau einer Bogenmauer. Auf alle Fälle aber hat dieser Zustand einen grossen Einfluss auf das statische Verhalten der Mauer, wobei zu bedenken ist, dass dieser Einfluss mit der Grösse der Mauer zunimmt.

Als weiterer wichtiger geologischer Umstand muss die Gesteinslagerung und deren Eignung für Ausbrucharbeiten bewertet werden. Bei ungünstigen Verhältnissen sind tiefe Einschnitte in den Talflanken wesentlich schwieriger, gefährlicher und teurer als bei günstigen. Dabei ist klar, dass diese Arbeiten je nach dem Typus der Mauer sich anders gestalten werden, so dass in bestimmten Fällen die Wahl zwischen verschiedenen Mauerprojekten durch diesen Umstand ausschlaggebend beeinflusst werden kann.

5. Betonqualität

Aus den vorstehenden Betrachtungen geht hervor, dass die Entwicklung der Bogenmauern nach verschiedenen Richtungen hin begrenzt ist. Die massgebende Grenze liegt aber, wie bei jedem Bauwerk, bei der erreichbaren Qualität des Baustoffes. Je grösser und kühner eine Bogenmauer ist, umso höhere Spannungen ergeben sich, und umso höhere Spannungen müssen also als zulässig angenommen werden. Eine Heraufsetzung der zulässigen Spannungen kann durch Herstellung eines Betons höherer Qualität und Gleichmässigkeit oder durch Herabsetzung des rechnerischen Sicherheitsgrades geschehen. Wenn auch Fortschritte in der Herstellung des Betons immer noch zu erwarten sind, wird doch wohl bald eine obere Grenze der Druckfestigkeit erreicht sein. Diese Grenze wird freilich von Fall zu Fall verschieden und vor allem vom vorhandenen Zuschlagsmaterial abhängig sein. Deswegen sind eingehende Untersuchungen über die in jedem Einzelfall wirtschaftlich erreichbare Betongüte schon beim Vorprojekt einer grossen Bogenmauer unerlässlich.

6. Sicherheitsgrad

Die Frage der Bestimmung der rechnerischen und wirklichen Sicherheitsgrade ist sehr verwickelt und bedarf einiger weiterer Ausführungen.

Man muss zugeben, dass beim heutigen Stand der Ingenieurwissenschaft bei der Festsetzung des Sicherheitsgrades immer noch ein grosser Anteil Willkür vorhanden ist. Seine theoretische Bestimmung ist gegenwärtig meistens nicht möglich, und schon seine Definition ist nicht eindeutig. Jedemfalls kann man mit Bestimmtheit sagen, dass bei den Stau-mauern die Definition des Sicherheitsgrades als Verhältnis der Bruchfestigkeit zur zulässigen Spannung ungenügend ist. Eine Bestimmung des Sicherheitsgrades im Sinne des Traglastverfahrens scheint viel zutreffender zu sein. Darunter versteht man das Verhältnis der Bruchlast zur tatsächlichen Belastung, also hier zur Wasserlast. Der Unterschied zwischen beiden Methoden kann auf Grund des Vergleiches der Sicherheit einer geraden Gewichtsmauer von etwa 200 m Höhe mit normalem Dreieck-Profil mit derjenigen einer gleich hohen projektierten Bogenmauer erläutert werden. Setzen wir z. B.

in beiden Fällen ein gleiches nominelles Verhältnis von 4 zwischen Prismendruckfestigkeit und zulässiger Spannung voraus, so ergibt sich für die Gewichtsmauer eine Sicherheit gegen Bruch (eigentlich Kippen) von 1,5 bis 2, die praktisch von der Betonbruchfestigkeit unabhängig ist. Wie ersichtlich, ist hier der wirkliche Sicherheitsgrad viel kleiner als der nominelle. Bei der Bogenstau-mauer sind die Verhältnisse gerade umgekehrt und der oben definierte Sicherheitsgrad stellt sich auf 5 bis 6, also viel höher ein als das Verhältnis Prismendruckfestigkeit zur zulässigen Spannung.

Der Vergleich der Sicherheit beider Mauertypen kann auch auf Grund des tragbaren Ueberstaus geschehen. Während bei einer Gewichtsmauer dieser Ueberstau im allgemeinen nur gering ist und von der Kronenbreite abhängt, so könnte rein statisch betrachtet die oben erwähnte Bogenstau-mauer einen Ueberstau von 100 bis 150 m aushalten. Man sieht also, dass eine solche Bogenmauer auch dann noch standsicher wäre, wenn der Ueberstau ein Mass annimmt, das praktisch bei weitem nie in Frage kommen kann.

Von ähnlichen Gedankengängen ausgehend wurde auch schon gesagt, dass die Sicherheit einer Stau-mauer durch die Form und nicht durch die Masse zu erreichen sei. Damit wollte man, allerdings in etwas überspitzter Art, den sehr grossen Einfluss der Krümmung auf die Standsicherheit der Mauer ausdrücken. Diesen Einfluss hat man auch Formfestigkeit genannt. In präziserer Formulierung kann man sagen, dass die Sicherheit durch die «formgerechte Verteilung einer genügenden Masse» zu erreichen sei. Die wahre Rechtfertigung dieser Erkenntnis ergibt sich aus dem Verhalten der Mauer bei katastrophalen Einwirkungen, so z. B. bei Dislokationserdbeben. Es ist bei gewissen tektonischen Untergrund-Verhältnissen denkbar, dass sich bei solchen Beben Spalten in der Talsohle bilden und eine möglicherweise sogar von Verwerfungen begleitete Ausweitung des Tales stattfindet¹⁾. Durch eine solche Katastrophe kann die Bogenwirkung wenn auch kaum ganz ausgeschaltet, so doch beträchtlich vermindert werden. In einem solchen Fall wäre eine Aushilfe durch die andere statische Wirkung der Mauer, die Konsolwirkung, sicherlich sehr erwünscht. Diese Konsolwirkung kann aber nur dann wirklich von Nutzen sein, wenn die Konsolen genügend stark sind, wenn also die Mauer eine genügende Dicke aufweist. So versteht man, dass in verschiedenen Fällen die sog. Bogengewichtsmauer der dünnern Bogenmauer vorgezogen worden ist. Bei einer solchen Entscheidung darf der verantwortliche Ingenieur aber auch folgende zwei Faktoren nicht ausser acht lassen, die für die dünnere Mauer sprechen: Je grösser die Masse der Mauer ist, um so

1) Zur Verdeutlichung können hier die Bilder 2 und 3 dienen. Sie zeigen eine bei einem Dislokationsbeben entstandene rezente Verwerfung von 15 bis 20 m Sprunghöhe und mehreren km Länge auf der Westseite der Cordillera Blanca in Peru. Bild 3 (Aufnahme Prof. W. Leupold im Sommer 1952) zeigt die terrestrische Aufnahme des in der Luftaufnahme (Bild 2) markierten Ausschnittes der Verwerfung, die hier durch eine Seitenmoräne und durch Alluvionen verläuft. Es bedarf keiner weiteren Erläuterung, warum in einer so gefährdeten Gegend eine Sperrmauer überhaupt unzulässig ist.

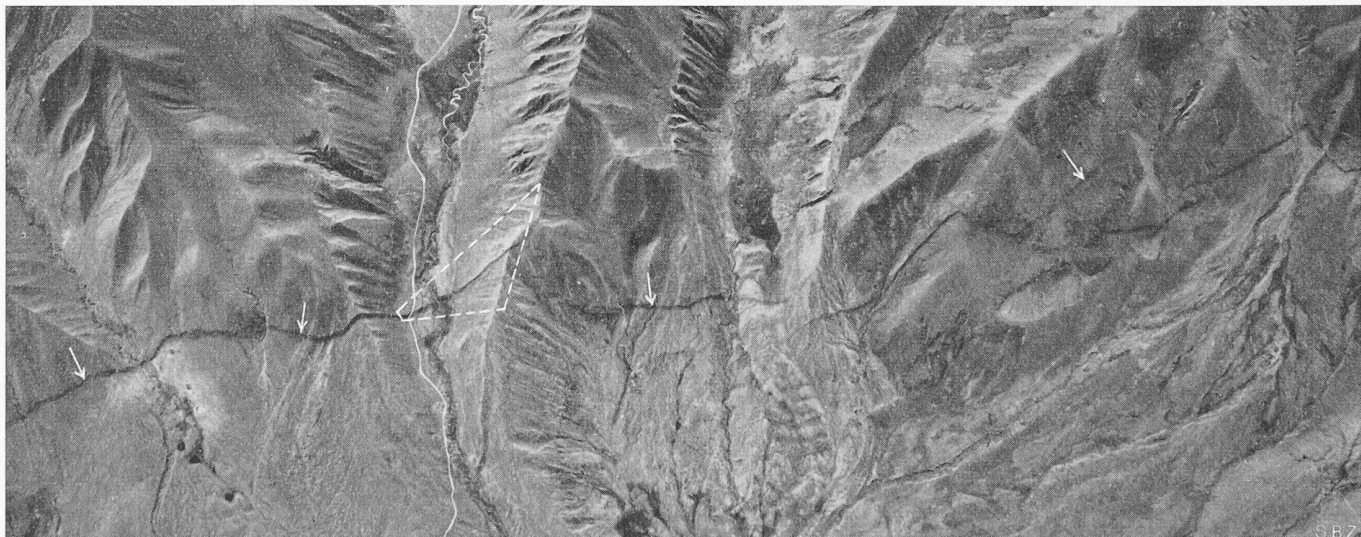


Bild 2. Flugbild einer rezenten Verwerfung (mit weissen Pfeilen bezeichnet) in der Cordillera Blanca in Peru. Das gestrichelt umfasste Gebiet ist in Bild 3 dargestellt. Weisser Strich = Strasse.



Bild 3. Auf diesem Bild verläuft der Bruch (weisse Pfeile) im Hintergrund durch einen Seitenmoränenkamm. Im Vordergrund wurde die Alluvionalebene des Baches verworfen (Höhenunterschied zwischen a und b etwa 10 m). Photo W. Leupold.

grösser ist auch die auf sie bei einem Beben einwirkende Beschleunigungskraft. Dünnere Bogen können sich leichter an eine Ausweitung des Tales anpassen als dickere. Hierbei ist aber auch klar, dass zwar der Einfluss einer angenommenen Talausweitung auf die Beanspruchung der Bogen ohne weiteres ermittelt werden kann, dass aber eine sichere Abschätzung der Vorgänge bei solchen Naturkatastrophen selbstverständlich unmöglich ist.

Es sei zuletzt noch auf die Beziehungen hingewiesen, die zwischen der Kühnheitsziffer der Mauer und ihrem Sicherheitsgrad bestehen können. Wie wir schon ausgeführt haben, wird die Kühnheit einer Mauer der möglichen erreichbaren Betonqualität angepasst. Somit ist es klar, dass eine kühnere Mauer nicht von vornherein weniger sicher wäre als eine andere, ja dass das Gegenteil ebensogut zutreffen kann. So sei z. B. erwähnt, dass bei gleichen rechnerischen Verhältnissen Bruchfestigkeit zu zulässiger Spannung der wirkliche Sicherheitsgrad in jedem Einzelfall für eine ganz bestimmte Dicke der Mauer ein Maximum erreicht und dann für dickere oder dünnere Mauern wieder abnimmt.

7. Bemerkungen zur Berechnung von Bogenmauern

Bekanntlich wird die Berechnung von Bogenmauern meistens auf der Basis der sog. Trägerrostmethode durchgeführt, bei welcher die Mauer durch eine Anzahl von Bogen und Konsolen ersetzt und die äussere Last zwischen den beiden Trägergruppen durch Gleichsetzung der radialen Verformung aufgeteilt wird.

Das amerikanische Bureau of Reclamation hat aus dieser Methode das sogenannte Versuchslastverfahren (Trial load method) entwickelt, das durch Berücksichtigung der Radial-, Tangential- und Drehverformungen auch den Einfluss des tangentialen Schubes und der Drillung erfassen will. Die erforderlichen Berechnungen sind jedoch unverhältnismässig umfangreich und kostspielig, sodass diese Methode in Europa kaum zur Anwendung kommen kann. Hingegen ist es gelungen, eine Erweiterung der Trägerrostmethode für die Mitbe-

rücksichtigung der Torsion, leider nicht des Tangentialschubes, auf viel einfachere Art zu entwickeln.

Es ergab sich, dass im allgemeinen die Berücksichtigung der Torsion eine Verminderung der Zugspannungen und eine ausgedehnte Entlastung der Mauer, insbesondere im mittleren Teil dadurch herbeiführt, dass ein Teil der Wasserlast durch die Drillung direkt gegen die Fundamente abgeleitet wird. Die wirkliche Lösung des statischen Problems der Bogenmauern, besonders der dünnen Mauern, liegt jedoch letzten Endes bei der Schalentheorie. Die Schwierigkeiten, die hier angetroffen werden, sind aber sehr gross, vor allem bei komplizierter Form des Tales und daher auch der Mauer. Unter besonderen Voraussetzungen und in Einzelfällen ist jedoch eine solche Berechnung tunlich.

8. Wirtschaftlichkeit

Es ist nicht möglich, in dieser kurzen Abhandlung den Vergleich von Bogenstaumauern und Gewichtsmauern so weit darzulegen, dass eine allgemein gültige Abklärung erreicht werden könnte. Die grosse Entwicklung, welche die Technik der Bogenmauern in letzter Zeit erfahren hat, und die Tatsache, dass manche Akkumulieranlage erst durch Anwendung von Bogenmauern wirtschaftlich wurde, zeugt dafür, dass dieser Mauertyp oft überlegen ist. Dies ist umso mehr der Fall, wenn neben der Wirtschaftlichkeit auch die grössere Sicherheit, welche sich mit diesem Mauertyp erreichen lässt, gebührend gewürdigt wird.

Interessanter ist es, die Wirtschaftlichkeit verschiedener Bogenstaumauerprojekte an der gleichen Sperrstelle miteinander zu vergleichen. Solche Untersuchungen haben gezeigt, dass die «kühnste» Mauer nicht immer die wirtschaftlichste ist, weil eine kühnere Mauer einen hochwertigeren und folglich teureren Beton verlangt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass eine Erhöhung der Zementdosierung eine entsprechende Erhöhung der beim Abbinden entstehenden Wärmemenge erzeugt und somit wirkungsvollere Kühlvorrichtungen notwendig machen kann. Schon aus diesen Umständen geht hervor, dass Kühnheit einer Bogenmauer nicht ohne weiteres mit Wirtschaftlichkeit gleichgesetzt werden kann, sondern dass jeder Fall individuell zu bewerten ist.

*

Die Frage allfälliger konstruktiver Massnahmen gegen Zerstörungen im Krieg durch Bomben wurde nicht in unsere Betrachtungen einbezogen, weil hierfür zunächst die Wirksamkeit der vorhandenen und der in den nächsten Jahrzehnten zu erwartenden Zerstörungsmittel weiter abgeklärt sein müsste²⁾; dieses in erster Linie militärtechnische Problem ist naturgemäss sehr hypothetisch. Es ist daher unseres Erachtens wichtiger und zweckmässiger, bei jeder grösseren Talsperre Entleerungseinrichtungen anzulegen, welche erlauben, den Seeinhalt innert kurzer Frist so tief abzusenken, dass der Wasserablauf durch Mauerbreschen, die durch Bombentreffer entstehen können, nie so gross wird, dass im Unterlauf des Flusses katastrophale Zerstörungen durch die Flutwelle entstehen können.

Die vorliegende Studie bezweckt, eine möglichst knappe Uebersicht über die Probleme zu vermitteln, welche sich bei Bogenmauern stellen. Vielleicht mag sie auch Anlass zu weiteren Studien und Auseinandersetzungen mit diesen Fragen geben.

²⁾ Schwerste Bomben im letzten Weltkrieg hatten 2000 kg mit 50 Vol. % Explosivstoff, heute bereits 5000 kg mit 80 Vol. %.

Erhaltung von Kunstdenkmälern durch die UNESCO

DK 719.32

Die byzantinische Kreuzkuppelkirche Hagia Sophia in Ochrida ist eines der bedeutendsten Baudenkmäler Mazedoniens, sie stammt wahrscheinlich aus dem Ende des 11. Jahrhunderts; spätere Zutaten und Veränderungen haben ihren Charakter nicht wesentlich getrübt, sie ist mit bedeutenden Fresken aus dem 11. bis 14. Jahrhundert geschmückt. Bauwerk und Fresken sind vom Verfall bedroht.

Auf Ersuchen der jugoslawischen Regierung wurde eine Kommission erster Fachleute der italienischen und französischen Denkmalpflege um Vorschläge zur Sicherung und Wiederherstellung ersucht; die vorliegende Publikation¹⁾ enthält dieses Gutachten.

¹⁾ *Sainte-Sophie d'Ochrida. La conservation et la restauration de l'édifice et de ses fresques.* 27 p. avec des photos et fig. Paris 1953, UNESCO, 19, Avenue Kléber. Preis kart. 5 Fr.