Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 79/80 (1922)
Heft: 6

Artikel: Durchbiegungen und Spannungen in Gewölbe-Staumauern
Autor: Noetzli, F.A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-38128

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 20.02.2026

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

INHALT: Durchbiegungen und Spannungen in Gewölbe-Staumauern. — Heizwagen mit Elektroden-Kessel für 15 000 Volt der Schweizer. Bundesbahnen. — Finnlands Wasserkräfte. — Das farbige Zürich. — Die projektierten Kraftwerke am Hinterrhein. — † Prof. Dr. Theodor Vetter. — Miscellanea: Das neue Dampfkraftwerk Gennevelliers bei Paris. Schweizerischer Techniker-Verband. Ausfuhr elektrischer Energie. Umbau des Themse-Tunnels der City- and South London Railway. Eine freie Akademie des Städtebaues. R. H. Mantel. — Nekrologie: E. La Roche. — Konkurrenzen: Verwaltungsgebäude für die städtischen Betriebe in Lausanne. Primar- und Sekundarschulhaus Wetzikon. Neues Kantonschul-Gebäude Winterthur. — Internationales Preisausschreiben für einen Flugzeug-Höhenmesser. — Literatur. — Stellenvermittlung.

Band 80. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 6.

Durchbiegungen und Spannungen in Gewölbe-Staumauern.

Von Dr. Ing. *F. A. Noetzli*, San Francisco.[1])

Die statische Berechnung von Gewölbe-Staumauern unter Berücksichtigung von elastischen Formänderungen des Mauerwerks ist ein Problem, dessen korrekte Lösung ausser in einigen speziellen Fällen dem Statiker ganz besondere Schwierigkeiten bietet.

Die Berechnung der horizontalen Gewölbe-Elemente, in die gewöhnlich eine solche Mauer zum Zwecke der statischen Untersuchung eingeteilt gedacht wird, bietet schon an und für sich gewisse Schwierigkeiten, indem in verschiedenen Höhen derselben Mauer meist verschieden grosse Spannweiten, Krümmungsradien und Gewölbestärken vorkommen, und da zudem die Belastung dieser Elementar-Gewölbe entsprechend der Tiefe unter der Wasseroberfläche sich ändert. Die Verhältnisse werden noch dadurch ganz ausserordentlich kompliziert, dass die untersten Gewölbeteile infolge ihres Zusammenhanges mit der Felsfundation und durch das Gewicht der über ihnen liegenden Mauermassen in der freien Gewölbewirkung gehemmt und zum Teil ganz gehindert sind. Dazu kommen die Ungewissheiten inbezug auf den Elastizitätsmodul des oft viele Meter dicken Mauerkörpers, ferner unsere vorläufig noch recht beschränkte Kenntnis in Bezug auf Bereich und Verlauf der Temperatur-Schwankungen im Innern der Mauer, Schwinden des Betons beim Abbinden, Schwellen unter dem Einfluss des die Mauerporen füllenden Wassers u. a. m.

Diese Darlegungen zeigen zur Genüge, dass eine theoretisch exakte Lösung des Problems der Gewölbe-Mauern kaum je möglich sein wird, ganz besonders nicht im Falle unregelmässigen Längenprofils der Mauer, was in der Praxis sehr oft vorkommt.

Verschiedene Methoden zur näherungsweisen Berechnung von Bogenmauern sind bisher bekannt geworden, wobei die den wirklichen Verhältnissen wohl am nächsten kommende darin besteht, dass man sich die Mauer eingeteilt denkt das eine Mal in eine Reihe von übereinander liegenden horizontalen Elementar-Gewölben, und das andere Mal in eine Serie von radial aus dem Mauerkörper herausgeschnittenen vertikalen Kragträgern[2]). Der Wasserdruck wird dann auf beide Systeme derart verteilt, dass die horizontalen Gewölbe unter ihrem Anteil der Last in jedem Punkte sich genau gleich viel durchbiegen wie die entsprechenden vertikalen Kragträger in den gleichen Punkten.

Die meisten bisher gebauten Gewölbe-Staumauern sind jedoch berechnet worden unter der einfachen Annahme, dass die Stabilität der Mauer vollständig gesichert sei, falls jedes horizontale Elementar-Gewölbe dem vollen darauf wirkenden Wasserdruck mit einem genügenden Sicherheitsgrad widerstehen könne. Die in den Gewölben infolge Schwinden des Betons, Temperaturänderung usw. auftretenden Nebenspannungen wurden dabei ganz ausser Acht gelassen, und die unfehlbar in allen diesen Mauern auftretenden Risse wurden als unvermeidliches Uebel in Kauf genommen.

[1]) Für diejenigen unserer Leser, denen der Autor unbekannt ist, sei erwähnt, dass er von 1906 bis 1911 an der E. T. H. studiert, an dieser im S. S. 1915 Prof. F. Baeschlin vertreten hat, und dass er seither als Bauingenieur in Nordamerika erfolgreich tätig ist. Für seine Arbeiten auf dem Gebiete der Gewölbe-Staumauern hat ihn kürzlich die «American Soc. of Civil Engineers» mit ihrer Goldenen Medaille ausgezeichnet. *Red.*

[2]) Dr. Ing. *Hugo Ritter*, «Die Berechnung von bogenförmigen Staumauern», Karlsruhe 1913.

Besonders die Amerikaner haben bisher fast ausschliesslich diese Berechnungsart angewandt, und dem kühnen Pioniergeist der Ingenieure des Westens sind manche derartige Bauten zu verdanken, die praktisch sich ausnahmslos glänzend bewährt haben, obschon nach den Grundsätzen moderner Theorie die statischen Verhältnisse dieser Mauern teilweise als geradezu trostlos erscheinen. Allein noch keine einzige Bogen-Staumauer ist je eingestürzt, und diese Tatsache vermag ganz zweifellos viele Bedenken theoretischer Art wenigstens zum Teil zu beschwichtigen. Es ist aber gerade deshalb, weil Theorie und Praxis sich anscheinend so sehr widersprechen, doppelt wünschenswert, dass für alle diese Mauern genaue Spannungs-, Temperatur- und Durchbiegungsmessungen gemacht werden, um den wirklichen Grad ihrer Standsicherheit besser erkennen zu lassen.

Näherungsmethode zur Berechnung der Spannungen in Gewölbe-Staumauern auf Grund gemessener Durchbiegungen.

Die oben angeführten Gründe betreffs Ungewissheit in den einer Berechnung zu Grunde zu legenden Annahmen lassen es zum vornherein als sehr zweifelhaft erscheinen, ob genaue Gewölbe-Formeln, wie sie z. B. zur Berechnung von Bogenbrücken mit Erfolg angewendet werden, im Falle von Gewölbemauern auch zu entsprechend genauen Ergebnissen führen würden. Aus diesem Grunde mag es zweckmässig sein, wenigstens für ein Uebergang-Stadium, der Einfachheit halber Näherungsmethoden anzuwenden, und darnach zu trachten, aus Messungen und Experimenten mit der Zeit genauere Koeffizienten für die Formeln zu erhalten.

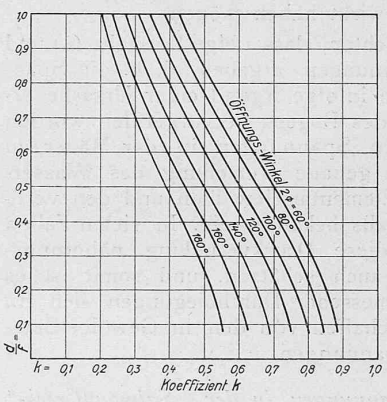

Abb. 1.

Die Durchbiegung des Scheitels eines Kreisgewölbes mit radialer Belastung ist näherungsweise[1])

$$D = \frac{3}{16}\,\frac{l}{f}\,\Delta l \qquad (1)$$

wobei D die Durchbiegung des Gewölbes im Scheitel, l die Länge der Gewölbe-Axe, f die Pfeilhöhe der Gewölbe-Axe und Δl die Aenderung der Länge der Bogenaxe infolge radialer Belastung des Bogens, Temperaturschwankungen, Schwinden usw., bedeuten.

Anderseits ist der durch eine Aenderung der Länge eines eingespannten Bogens von konstantem Trägheitsmoment erzeugte Horizontalschub[2])

$$H_e = k\,\frac{E\,d^3}{f^2\,l}\,\Delta l \qquad (2)$$

Hierin bezeichnet H_e den im Schwerpunkt des Bogens wirkenden „Deformations"-Schub, d die Dicke des Gewölbes, E den Elastizitätsmodul und k eine Konstante, die auf Grund der bekannten fundamentalen Gleichungen der elastischen Formänderungen eines Gewölbes von der Breite = 1 berechnet wurde. Die Konstante k ist dabei aus den Kurven der Abbildung 1 für die verschiedenen in der Praxis vorkommenden Verhältnisse $d:f$ und Oeffnungs-Winkel $2\,\delta$ des Bogens, zu entnehmen.

[1]) *F. A. Noetzli*, «Gravity and Arch Action in Curved Dams» Transactions Am. Soc. C. E. Band 84, Seite 1.

[2]) *F. A. Noetzli*, «The Relation between Deflections and Stresses in Arch Dams», Proceedings Am. Soc. C. E., Oktober 1921, Seite 261.

Für Kreisgewölbe von konstantem Trägheitsmoment wirkt der Deformationsschub H_e ungefähr im Abstand von $\frac{1}{3}$ Pfeilhöhe vom Scheitel. Ferner ist näherungsweise

$$\frac{l^2}{f} = 8{,}3\ R \qquad (3)$$

wobei R der Radius der Gewölbeaxe ist.

Unter Berücksichtigung der Formeln (1), (2) und (3) erhält man nach einfacher Umrechnung für die „Deformationspannungen" in einem solchen Gewölbe von der Breite = 1 näherungsweise folgende Werte

im Scheitel: $$\sigma_o'' = 0{,}64\ k\ D\ \frac{E}{R}\ \frac{d}{f}\left(\frac{d}{f} \pm 2\right) \qquad (4)$$

in den Kämpfern: $$\sigma_u'' = 0{,}64\ k\ D\ \frac{E}{R}\ \frac{d}{f}\left(\frac{d}{f} \pm 4\right) \qquad (5)$$

Die Vorzeichen der Spannungen, d. h. ob Zug oder Druck, können leicht gefunden werden aus der Ueberlegung, dass eine Durchbiegung der Mauer talabwärts (Deformationschub negativ) im Scheitel auf der Luftseite Zug, und auf der Wasserseite Druck erzeugt; ferner, an den Kämpfern Zug auf der Wasserseite und Druck auf der Luftseite. Für eine Bewegung der Mauer talaufwärts (Deformationschub positiv) z. B. infolge einer Temperaturzunahme, sind die Vorzeichen der Deformationspannungen umgekehrt.

Es ist dabei von Interesse zu bemerken, dass diese Deformationspannungen im Bereiche der Genauigkeit der Formeln (4) und (5) unabhängig sind davon, ob die Durchbiegungen hervorgerufen worden sind durch Kürzung des Bogens infolge Wasserdruck, oder durch Aenderung der Länge infolge Temperaturschwankungen, Schwinden, Schwellen u. a. m. Dies ist natürlich von besonderem Vorteil für die Bestimmung der Spannungen in bestehenden Gewölbe-Mauern, indem man dabei mehr oder weniger unabhängig ist vom Temperaturzustand und all den andern nur schwer zu analysierenden Einzeleinflüssen, die bei der Durchbiegung mitgewirkt haben mögen.

Es ist aber zu beachten, dass obige Formeln (4) und (5) nur die Nebenspannungen ergeben, d. h. die Spannungen, die durch eine infolge irgend einer Ursache erfolgte Längenänderung des Bogens hervorgerufen worden sind. Um die wirklichen Spannungen in der Mauer zu bestimmen, müsste die genaue Verteilung des Wasserdruckes zwischen den Elementar-Gewölben und den vertikalen Kragträgern ebenfalls bekannt sein. In vielen Fällen der Praxis lässt sich diese Druckverteilung näherungsweise berechnen oder auch schätzen, und somit ist es möglich, auf Grund gemessener Durchbiegungen sich ein ungefähres Bild zu verschaffen von den in Gewölbe-Staumauern auftretenden Spannungen.

Durchbiegungen und Spannungen in der „Salmon Creek-" Gewölbe-Mauer.

Einer der bekanntesten Bogendämme Nordamerikas ist die nach dem Prinzip des veränderlichen Radius, bezw. konstanten Zentriwinkels gebaute Mauer am Salmon Creek in Alaska.[1]) Diese Sperre wurde von dem Ingenieur L. Jörgensen berechnet, und nach seinem Patent und unter seiner Leitung in den Jahren 1913/14 gebaut. In den „Transactions" der Am. Soc. C. E., Band 83 (1919/20) veröffentlichte Jörgensen eine Reihe von Durchbiegungs-Messungen, die in den ersten Jahren nach dem Bau an der Mauer gemacht wurden, und die von ganz besonderem Interesse sind.

Abbildung 2 gibt den Lageplan, Abbildung 3 zeigt den maximalen Querschnitt der Mauer und die zu verschiedenen Zeiten und in acht verschiedenen Höhen gemessenen Durchbiegungen. Diese Mauer enthält rund 40 000 m³ Beton. Die Kosten waren etwa 50 Fr./m³ und die ganze Sperre kostete etwa 2 Mill. Fr.

[1]) *L. Jörgensen*, «The Constant Angle Arch Dam», Transactions Am. Soc. C. E. Band 78, 1915; ferner vom selben Autor: «Improving Arch Action in Curved Dams», Transactions Am Soc. C. E., Band 83.

Die Biegungslinien dieser Mauer, die alle ungefähr die Bewegungen der Gewölbescheitel wiedergeben, sind aus verschiedenen Gründen höchst bemerkenswert.

Am auffallendsten ist wohl die Grösse des Winkels, den die Axe des deformierten vertikalen Kragträgers bildet mit der als ursprünglich senkrecht angenommenen Axe; ferner das „Knie" in der Biegungslinie ungefähr in halber Höhe der Mauer, sowie die markanten Durchbiegungen in der Nähe der Mauerkrone, die den grossen Einfluss der Lufttemperatur wiederspiegeln.

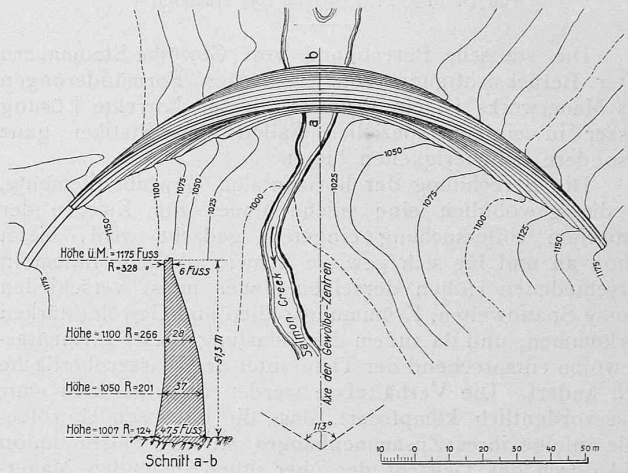

Abb. 2. Grundriss und Querschnitt der Salmon-Creek-Staumauer. — 1 : 2000.

Analytische Untersuchungen dieser Biegungslinien haben gezeigt,[1]) dass sehr wahrscheinlich horizontale Risse in der Mauer bestehen, sowohl in der Nähe des Fundamentes, wie in der Höhe des „Knies", und ebenfalls wenige Meter unterhalb der Mauerkrone. Anders lassen sich diese Eigenheiten der Biegungslinie dieser Mauer, die keine Eisenbewehrung aufweist, kaum erklären.

Laut Angabe von Ing. Jörgensen hatten sich vor der ersten Füllung des Stausees die vertikalen Konstruktions-Fugen in der Mauer infolge niederer Temperatur (Alaska!) nicht unwesentlich geöffnet, und, wie in Abbildung 3 angedeutet, musste das Wasser im Stausee auf fast $^2/_3$ der vollen Mauerhöhe steigen, bevor die sichtbaren vertikalen Spalten und Risse sich unter dem Druck des steigenden Wassers schlossen. Der Betrag dieser ursprünglichen Durchbiegung ist leider nicht erhältlich, und die nachfolgenden Berechnungen müssen dementsprechend interpretiert werden. Jedenfalls ist sicher, dass, bevor die offenen vertikalen Risse geschlossen waren, keine Bogenwirkung vorhanden sein konnte, dass somit die vertikalen Kragträger anfänglich den ganzen Wasserdruck allein auszuhalten hatten. Das „Knie" der Biegungslinien in halber Höhe der Mauer findet seine Erklärung darin, dass ungefähr in jener Höhe die Arbeit während des Winters unterbrochen worden war; die Gewölbepartie, die die untere Hälfte des „Knies" bildet, war während der bereits sehr kühlen Herbsttage 1913 gegossen worden.

Die gewöhnlichen Biegung-Gleichungen für den einfachen Balken ergeben, dass die Zugspannungen in den vertikalen Kragträgern viel zu gross würden, um den Balken elastisch in die durch die Messungen ermittelte Lage zu bringen. Deshalb ist zu vermuten, dass sich in verschiedenen Höhen horizontale Risse gebildet haben. Falls dies richtig ist, also die vertikale Balkenwirkung mehr oder weniger zerstört ist, darf wohl angenommen werden, dass die horizontalen Bogenelemente ziemlich freie Gewölbewirkung ausüben, sodass also die Spannungsformeln (4) und (5) direkt angewendet werden dürfen. Der Einfluss des Temperatur-Unterschiedes an der Luft-, bezw. der Wasserseite der Mauer wurde vernachlässigt, da keine bezüglichen Messungen oder sonstige Anhaltspunkte vorliegen.

[1] *F. A. Noetzli*, «The Relation between Deflections and Stresses in Arch Dams», Proceedings Am. Soc. C. E., Oktober 1921, S. 261.

Die grösste Durchbiegung der Mauerkrone wurde am 27. Oktober 1915 gemessen (Kurve Nr. VII) und betrug 25 mm. Den Abbildungen 2 und 3 wurden folgende Dimensionen entnommen: $R = 99{,}0$ m, $d = 1{,}8$ m, $f = 45{,}7$ m, $2\,\delta = 114^0$. Aus Abbildung 1 erhält man, für $\frac{d}{f} = \frac{1{,}8}{45{,}7} = 0{,}04$ und $2\,\delta = 114^0$, die Konstante k zu 0,79. Der Elastizitätsmodul wurde angenommen zu $E = 175\,000$ kg/cm².

Somit ergeben sich die korrespondierenden Deformationspannungen im Scheitel zu

$$\sigma_o^{u\prime} = 0{,}64 \times 0{,}79 \times 0{,}025 \frac{175\,000}{99{,}0} 0{,}04 \; (0{,}04 \pm 2)$$

$$\sigma_u' = 1{,}8 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Zug)}$$

$$\sigma_o' = -1{,}7 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Druck)}$$

In den Kämpfern ist

$$\sigma_u^{o\prime} = 0{,}64 \times 0{,}79 \times 0{,}025 \frac{175\,000}{99{,}0} 0{,}04 \; (0{,}04 \pm 4)$$

$$\sigma_o' = 3{,}6 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Zug)}$$

$$\sigma_u' = -3{,}5 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Druck)}$$

Am nämlichen Tage betrug die Durchbiegung der Mauer in einer Höhe von etwa 32 m über dem Fundament 21 mm (Kurve Nr. VII, Abbildung 3). Für das dortige Elementar-Gewölbe ist $R = 86{,}0$ m, $d = 7{,}3$ m, $f = 23{,}2$ m, $2\,\delta = 86^0$, $\frac{d}{f} = 0{,}31$ und $k = 0{,}74$. Folglich ist im Scheitel:

$$\sigma_o^{u\prime} = 0{,}64 \times 0{,}74 \times 0{,}021 \frac{175\,000}{86{,}0} 0{,}31 \; (0{,}31 \pm 2)$$

$$\sigma_u' = 14{,}5 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Zug)}$$

$$\sigma_o' = -10{,}6 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Druck)}$$

und in den Kämpfern:

$$\sigma_u^{o\prime} = 0{,}64 \times 0{,}74 \times 0{,}021 \frac{175\,000}{86{,}0} 0{,}31 \; (0{,}31 \pm 4)$$

$$\sigma_o' = 27{,}0 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Zug)}$$

$$\sigma_u' = -23{,}1 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Druck)}$$

Um die wirklichen Spannungen in den Gewölben zu erhalten, müssen die oben berechneten Deformations-Spannungen mit den durch den Wasserdruck direkt hervorgerufenen axialen Spannungen zusammengesetzt werden.

Auf das zuletzt betrachtete Elementar-Gewölbe wirkt ein radialer Wasserdruck von 17 700 kg/m². Unter Vernachlässigung allfälliger Uebertragung der Last durch Scherkräfte nach oben oder nach unten (Kragträger gebrochen), erhält man eine axiale Beanspruchung von

$$\sigma_{o,u}'' = -\frac{17\,700\left(86{,}0 + \frac{7{,}3}{2}\right)}{7{,}3} = -21{,}8 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Druck)}$$

Durch Kombination der axialen mit den Deformations-Spannungen erhält man wirkliche Spannungen im Scheitel:

$$\sigma_u = -21{,}8 + 14{,}5 = -7{,}3 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Druck)}$$

$$\sigma_o = -21{,}8 - 10{,}6 = -32{,}4 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Druck)}$$

in den Kämpfern:

$$\sigma_o = -21{,}8 + 27{,}0 = +5{,}2 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Zug)}$$

$$\sigma_u = -21{,}8 - 23{,}1 = -44{,}9 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Druck)}$$

In ähnlicher Weise können alle anderen Elementar-Bogen dieser Mauer untersucht werden, doch ist dabei zu beachten, dass in den tiefern Lagen, wo das Gewölbe im Verhältnis zu Radius und Spannweite sehr dick ist, theoretische Gewölbewirkung aus bereits früher angeführten Gründen nicht mehr, oder nur in beschränktem Masse möglich ist. Es ist wahrscheinlich, dass sich in solch kurzen, dicken Gewölbepartien immer sekundäre Gewölbe mit kürzerem Radius und grösserer Pfeilhöhe bilden, für die die Deformationsarbeit kleiner ist als für das primäre.

Ferner ist es von grosser Wichtigkeit zu beachten, dass in nicht armierten Gewölben beim Auftreten von Zugspannungen, die genügend gross sind, um die Konstruktionsfugen oder sonstige Risse zu öffnen, sich dementsprechend eine Art „Gelenke" bilden, die im wesentlichen nur noch Druckkräfte übertragen. Die Formeln (4) und (5) können dann auf einen solchen Deformations-Zustand nicht mehr direkt angewendet werden, da die rechnungsmässig gefundenen Spannungen grösser wären als die tatsächlich auftretenden. In solchen Fällen liegt der Wert dieser Formeln hauptsächlich darin, darauf hinzuweisen, dass für ein solches Gewölbe das Vorhandensein von offenen Rissen vermutet werden kann.

Die obigen Ergebnisse mögen infolge der gemachten vereinfachenden Annahmen mehr oder weniger von den in Wirklichkeit herrschenden Spannungen abweichen. Das Bemerkenswerte an der ganzen Sache ist, dass trotz der gewaltigen, durch die Gewölbe übertragenen Kräfte derart geringe Durchbiegungen vorkommen, und dass diese ver-

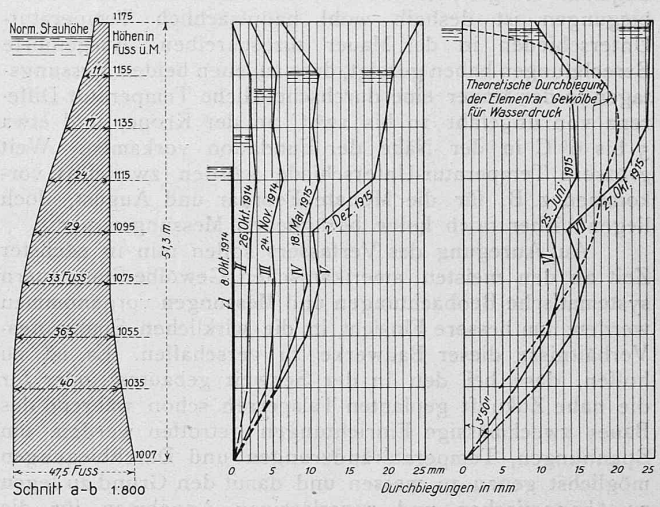

Abb. 3. Gemessene Durchbiegungen der Salmon Creek-Staumauer.

hältnismässig kleinen Formänderungen Nebenspannungen hervorrufen, die teilweise grösser sind als die den reinen axialen Kräften entsprechenden sog. Zylinderpressungen. Es scheint demnach, dass die rationelle Lösung des Problems der Bogenmauern darin liegt, höhere Einheitspannungen für direkten Druck zuzulassen, wodurch die Gewölbe dünner, und damit die Deformationspannungen geringer werden. Selbstverständlich sollen dann alle allfälligen Zugspannungen durch Eiseneinlagen aufgenommen werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Verminderung der Nebenspannungen in den Gewölben liegt darin, dass etwa das untere Drittel der Mauer als eine Serie von zwei oder mehreren konzentrischen Elementar-Gewölben aufgeführt wird, die z. B. durch vertikale Asphaltschichten von einander getrennt sind, sodass die Deformation der Elementargewölbe mit einem Minimum von gegenseitiger Reibung vor sich gehen kann. Nach Gleichungen (4) und (5) nehmen nämlich die Deformationspannungen ungefähr proportional mit dem Verhältnis von Bogendicke zu Pfeilhöhe ($d : f$) ab bei gleicher axialer Beanspruchung usw. Die Anordnung solcher vertikaler asphaltierter Fugen hat überdies den Vorteil, dass die vertikalen Kragträger elastischer werden, d. h. an Steifigkeit verlieren, und die Mauer demnach leichter in die mehr ökonomische Bogenwirkung übergehen kann. Ebenso lässt sich mit dieser Anordnung eine grössere Regelmässigkeit in der Struktur der untern Mauerteile erreichen.

Diese in Amerika patentierte Bauart verspricht, Gewölbemauern in statisch viel einwandfreierer Art ausführen zu können, als es bis anhin möglich schien.

Nach den hier angeführten Berechnungen scheint die Salmon Creek Mauer verschiedene Risse sowohl in vertikaler, wie auch in horizontaler Richtung aufzuweisen. Trotzdem versieht diese Sperre allem Anschein nach ihren Dienst vollständig und sie zeigt damit im Prinzip die geradezu wunderbare Zweckmässigkeit der Gewölbeform für derartige Bauten. Wenn daher durch eine geeignete Formgebung und Materialauswahl die maximalen Spannungen innert erlaubter Grenzen gehalten werden, ist eine solche Gewölbemauer zweifellos von ganz bedeutender Widerstands- und Anpassungsfähigkeit.

Es ist fernerhin zu beachten, dass den hier gegebenen Berechnungen nicht die für diese Mauer ungünstigsten Temperaturverhältnisse, die wahrscheinlich in der Mitte des Winters eintreten, zu Grunde gelegt sind. Die ganze Darlegung soll hauptsächlich als Beispiel dienen, um zu zeigen, welch grossen Nebenspannungen solche Bogenmauern unterworfen sein können.

Wie aus Abbildung 3 ersichtlich ist, war für die Kurven Nr. VI und VII die Wassertiefe im Stausee an den beiden Messungstagen (25. Juni und 27. Oktober 1915) ungefähr die gleiche. Die verschiedene Grösse der Durchbiegungen ist deshalb wohl hauptsächlich Temperatur-Unterschieden in der Mauer zuzuschreiben. Ausgeführte Berechnungen haben gezeigt, dass an jenen beiden Messungstagen in der Mauer eine durchschnittliche Temperatur-Differenz von ungefähr 10 bis 12° C an der Krone, und etwa 5 bis 6° C in der Nähe der Fundation vorkamen. Weit grössere Temperatur-Unterschiede würden zweifellos vorkommen z. B. für die Monate Februar und August, doch liegen bisher noch keine bezüglichen Messungen vor.

Auf Anregung des Verfassers sollen nun in nächster Zeit an den meisten amerikanischen Gewölbe-Staumauern systematische Beobachtungen und Messungen vorgenommen werden, um bessere Einsicht in die wirklichen Spannungs-Verhältnisse dieser Bauwerke zu verschaffen. Es ist zu hoffen, dass bei den in der Schweiz gebauten, oder für die nahe Zukunft geplanten Talsperren schon während des Baues zweckmässige Einrichtungen getroffen werden, um Spannungen, Temperaturänderungen und Durchbiegungen möglichst genau zu messen und damit den Grund zu legen zu ökonomischen und zuverlässigen Annahmen für die Berechnung künftiger derartiger Bauten.

Heizwagen mit Elektroden-Kessel für 15000 Volt der Schweizer. Bundesbahnen.

Von *F. Christen*, Ing. der S. B. B. in Bern.

Bei der elektrischen Traktion erfolgt die Heizung der Züge vermittelst Dampf oder unmittelbar durch Elektrizität (Widerstands-Heizkörper). Für internationale Züge kommt aus naheliegenden Gründen bis auf weiteres ausschliesslich die bisherige Heizung mittels Dampf zur Anwendung. Dabei wurde bis anhin der Dampf in Kesseln erzeugt, die mit Kohle oder Oel geheizt werden. In neuerer Zeit werden nun auch Kessel mit elektrischer Heizung, und zwar für nieder- oder hochgespannten Strom ausgeführt. Die Wirtschaftlichkeit dieser verschiedenen Heizsysteme hängt in der Hauptsache von den örtlichen Brennstoff- bezw. Stromkosten ab.

Bei grossen Heizleistungen, wie solche für normale und schwere Züge der Schweiz. Bundesbahnen nötig sind, eignet sich für die elektrische Dampferzeugung der Oekonomie halber allein der Hochspannungskessel, wobei der Strom direkt der Fahrleitung entnommen wird. Der mit einer solchen Anlage ausgerüstete Heizwagen kann an beliebiger Stelle des Zuges eingeschaltet werden, wodurch eine bessere, gleichmässigere Heizung des ganzen Zuges erreicht und öfters die Zugbildung vereinfacht werden kann.

Zur Abklärung dieses, mit Rücksicht auf die hohe Spannung von 15000 Volt neuen Problems, erklärten sich die S. B. B. auf Ansuchen der Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., Baden und der Firma Gebrüder Sulzer A.-G. in Winterthur bereit, vorgängig der Ausführung eines Heizwagens gemeinsame Vorversuche vorzunehmen. Diese in Bern im Sommer 1920 durchgeführten Untersuchungen haben in jeder Beziehung befriedigt. Dabei wurden insbesondere die Möglichkeit des Anheizens des Kessels mit Strom von dieser hohen Spannung, die Regulierfähigkeit und das Auftreten von Knallgas untersucht.

Versuche vom 6. und 8. März 1921 im Depot Bern.

Zeit	Amp. Kessel	Volt Kessel	Druck Kessel at	Druck Pumpe at	Amp. Motor	Elektroden-Stellg.	Bemerkungen
14.50	12	15000	0,0	0,6	19	36	Wassertemperatur etwa 95° C Eine Elektrode (Nr. 1) eingeschaltet
15.05	16	14000	0,8	1,4	17	20	
15.15	24	14200	1,8	2,3	17	10	
15.25	33	13700	3,6	4,0	17	0	
15.35	31	15000	6,1	6,6	18	5	
15.40	31	14500	8,0	8,6	20	5	
9.08	20	14500	0	0,6	18	36	Wassertemperatur etwa 95° C.
9.15	22	14500	0,1	0,8	18	36	
9.20	42	14000	1,0	1,6	17	5	Beide Elektroden eingeschaltet
9.30	54	14000	4,0	4,6	16	5	
9.40	30	14000	8,4	9,00	15	36	

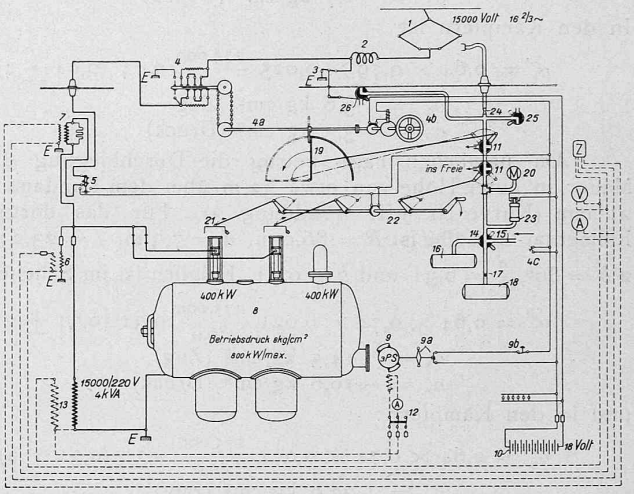

Abb. 2. Schaltungschema der elektrischen Ausrüstung des Heizwagens.

LEGENDE: 1 Stromabnehmer, 2 Drosselspule, 3 Erdungschalter, 4 Oelschalter mit Schutzwiderstand und Erdungschalter, 4a Transmission mit Verriegelung zur Türe des Hochspannungsraumes, 4b Handantrieb mit Ausschaltmagnet, 4c Notauslösung, 5 Haupt-Zeitrelais mit Kontaktvorrichtung, 6 Spannungstransformator 15000/220 Volt, 7 Messtromwandler 100/5 Amp., 8 Elektroden-Dampfkessel, 9 Motor für Wasserzirkulations-Pumpe, 9a Zentrifugalschalter (löst beim Stillstand des Motors Pos. 9 den Oelschalter Pos. 4 aus), 9b Anlass-Druckknopf mit Fussbetätigung zum Motor Pos. 9, 10 Batterie für Zugsbeleuchtung, 11 Dreiweghahn, 12 Schalter (normalerweise geschlossen), 13 Oeltransformator für Hilfstromkreis, 14 Dreiweghahn für Handluftpumpe, 15 Luftzufuhr von der Handluftpumpe, 16 Luftbehälter für Stromabnehmer, 17 Rückschlagventil, 18 Luftbehälter für Westinghouse-Bremse, 19 Türe zum Hochspannungsraum, 20 Kontaktmanometer mit Kontakt bei 2 at, 21 Dachklappe, 22 Notausschaltung, 23 Kontaktventil, 24 Drosselventil, 25 und 26 Zweiweghahnen.

Auf Grund der Ergebnisse dieser Versuche ist den beiden vorgenannten Firmen eine Heizanlage für Einphasen-Wechselstrom von 15000 Volt bei $16^2/_3$ Perioden, 8 at Betriebsdruck und 800 bis 1000 kW maximaler Leistung in Auftrag gegeben worden. Die Heizeinrichtung wurde in einen zweiachsigen Gepäckwagen eingebaut; ihre Bestandteile sind aus den nachstehenden Abbildungen 1 und 2 sowie aus dem Schaltschema Abbildung 3 ersichtlich.

Die Anlage besteht aus dem Kessel, einer in demselben eingebauten Pumpe, die von einem Elektromotor angetrieben wird und dem Wasserbehälter. Der Kessel, der direkt auf dem Wasserbehälter aufgebaut ist, wird durch zwei Injektoren gespiesen. Der Strom gelangt von der Fahrdrahtleitung durch den Stromabnehmer, das Trennmesser und zwei Induktionsspulen zum Hauptschalter. Von diesem führt eine Leitung unmittelbar zu den beiden Elektroden und eine andere zu einem Transformator 15000/220 Volt, der den Antriebstrom für den Pumpenmotor liefert. Die Zirkulationspumpe bewegt das Wasser durch das elektrische Feld der Elektroden mit einer solchen Geschwindigkeit, dass Ansammlungen von Dampfblasen und daherige Durchschläge verhindert werden. Gleichzeitig findet eine kontinuierliche Abkühlung der Elektroden statt. Die beiden Elektrodensysteme des Heizkessels können zur Regulierung der Dampfproduktion einzeln (mittels Trennmesser) ein- und ausgeschaltet werden, ferner ist eine weitere Einstellung durch Verschieben der Isolier-Rohre über den Elektroden möglich. Der Stromabnehmer wird