

Der Entwurf der Bogenstaumauer Monticello des United States Bureau of Reclamation

Autor(en): **Schnitter, N.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **74 (1956)**

Heft 16

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-62608>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

Der Entwurf der Bogenstaumauer Monticello

des United States Bureau of Reclamation

Von N. Schnitter, Dipl. Ing. ETH, J. M. ASCE, Motor-Columbus AG., Baden

Fortsetzung von S. 226

DK 627.824.7

IV. Statische Berechnung

A. Annahmen

Da die materialtechnischen Grundlagen und die Belastungsannahmen immer der wesentlichste Teil eines jeden statischen Nachweises sind, soll im folgenden besonders auf diese etwas ausführlicher eingegangen werden. Zudem revidierte das Bureau of Reclamation erst neulich seine Entwurfskriterien für Betonstaumauern⁷⁾ im Lichte der neuesten Erfahrungen und Forschungsergebnisse, während die eigentlichen Berechnungsverfahren fast seit dem Bau der Hoover-Sperre im wesentlichen die selben geblieben sind. Und doch sind letztere in mancher Beziehung immer noch um ein Vielfaches «genauer» als die oft ungenügend abgeklärten Ausgangsannahmen.

1. Elastische Eigenschaften des Felsens

Da in der statischen Berechnung von Bogenmauern, ebenfalls seit den unglaublich ausgedehnten Entwurfsarbeiten für die Hoover-Sperre, immer die Nachgiebigkeit des Untergrundes berücksichtigt wird, ist die Kenntnis der diesbezüglichen Elastizitätsmoduli und Querszahlen eines der Grundvoraussetzungen eines Spannungsnachweises. Die elastischen Eigenschaften des Felsens werden am Bureau of Reclamation im wesentlichen immer noch im Laboratorium an Bohrkernen ermittelt. An der Sperrstelle Monticello nahm man jedoch neuerdings auch eine Ueberprüfung der Ergebnisse aus den Laboratoriumsversuchen durch seismische Versuche im Felde vor. Im Labor selbst erfolgte die Bestimmung der elastischen Kennzahlen einerseits nach der wohlbekannten statischen Methode, d. h. durch Dehnungsmessungen im axialen Druckversuch, andererseits nach der Resonanzfrequenz-Methode, d. h. durch Vibrieren der Probekörper und Feststellung ihrer resonanten Frequenz. Letzteres Verfahren liefert ähnlich wie die seismische Messung im Felde, welche jedoch auf der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Stosswelle beruht und formunabhängig ist, einen sog. dynamischen Wert für den Elastizitätsmodul. Dieser sollte etwa dem statischen Elastizitätsmodul bei sehr kleiner Belastung (Tangente an die Spannungs-Dehnungskurve im Ursprung) entsprechen. Da die Messungen im Felde leider nicht ganz vollständig waren, erfolgt der folgende Vergleich der drei Methoden über die erwähnte Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, wie sie sich für die Laborversuche aus Elastizitätsmodul und Querszahl errechnen lässt:

	Elastizitätsmodul in t/m ²	Querszahl	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in m/s
Statische Methode	980 000	0,02	1940
Resonanzfrequenz-Methode	2 530 000	0,29	3650
Seismische Methode	—	—	2800

Auffallend sind vor allem die grossen Unterschiede in den Ergebnissen schon nur der Laborversuche. Das Resultat der seismischen Versuche stellt demnach etwa einen vernünftigen Mittelwert dar, abgesehen davon, dass diese Methode schon an sich eine Art Integration der Fundationsverhältnisse darstellen dürfte. Es ist zu bedauern, dass zur vollständigen Abklärung des Vergleichs nicht auch noch — als vierte Methode — statische Grossversuche im Felde (Druckplatte, Druckkammer) erfolgen konnten. Doch auch schon nur dieses kleine Beispiel zeigt wiederum, wie weit man gerade in der Fest-

⁶⁾ J. M. Raphael: The Development of Stresses in Shasta Dam, American Society of Civil Engineers, «Proceedings» Sep. 117, February 1952, oder «Transactions» Vol. 118, 1953, p. 289 (siehe auch F. Tölke, «Der Bauingenieur», April 1953, Seite 133).

⁷⁾ F. D. Kirn: Design Criteria for Concrete Gravity and Arch Dams, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph No. 19, October 1953.

stellung der wahren Felselastizität noch von einer eindeutigen Lösung entfernt ist. In die statische Berechnung selbst wurden die tiefsten Werte eingeführt, wie sie sich aus den zahlreichen statischen Versuchen für den mittleren Beanspruchungsbereich ergaben, d. h. ein Elastizitätsmodul von 920 000 t/m² und eine Querszahl von 0,03. Ersterer mag dem auch noch kaum erforschten Kriechen des Felsens Rechnung tragen, letzterer erscheint jedoch ziemlich tief gegriffen.

2. Elastische Eigenschaften des Betons

Im Gegensatz zum Felsen sind die elastischen Eigenschaften des Betons bedeutend besser bekannt und dank dessen Kunstprodukt-Natur auch viel einheitlicher. Schon im Rahmen der normalen Betonuntersuchungen werden am Bureau of Reclamation auch immer die elastischen Kennwerte ermittelt, entweder nach der statischen oder der Resonanzfrequenz-Methode. Als rasche und teilweise zerstörungsfreie, schon rein technologische Kontrolle haben sich diese Messungen in sehr weitgehendem Masse eingebürgert. Doch für eine statische Berechnung sind vor allem die elastischen Eigenschaften des Betons in höherem Alter und unter ständigen, bzw. nur relativ langsam wechselnden Lasten von Bedeutung. In Zusammenhang mit der Auswertung seiner Dehnungsmessungen an Staumauern hat das Bureau of Reclamation, wie erwähnt, während der letzten zehn Jahre ein ausgedehntes Versuchsprogramm zur Abklärung der Kriecheigenschaften von Massenbeton durchgeführt. Wegen der Bedeutung der Resultate, auch für den Entwurf, sollen die wichtigsten derselben nachstehend kurz zusammengefasst werden. Wohl das wesentlichste Ergebnis ist, dass es gelingt, die festgestellten Kriechvorgänge mit vorzüglicher Genauigkeit einfach mathematisch zu umschreiben⁶⁾. Die totale Verformung unter einer Einheitsbeanspruchung lässt sich zu jeder Zeit in Tagen nach der Lastaufbringung darstellen durch:

$$\epsilon = \frac{1}{E} + F(K) \cdot \ln(t + 1)$$

wobei der Elastizitätsmodul E und der Kriechfaktor F (K) vom Alter K des Betons bei der Belastung, bzw. Wiederentlastung abhängig sind. Auch die Kriechverformung ist im Bereich der üblichen Beanspruchungen proportional zur Spannung und unter Zug- und Druckbeanspruchung gleich. Ferner gilt das Superpositions-gesetz auch zeitlich, vorausgesetzt natürlich, dass jeweils für jede Laständerung die dem derzeitigen Betonalter zugehörigen Parameter eingeführt werden. Bild 6 zeigt die zeitliche Entwicklung dieser Parameter anhand ihrer Mittelwerte für die sechs untersuchten Massen-

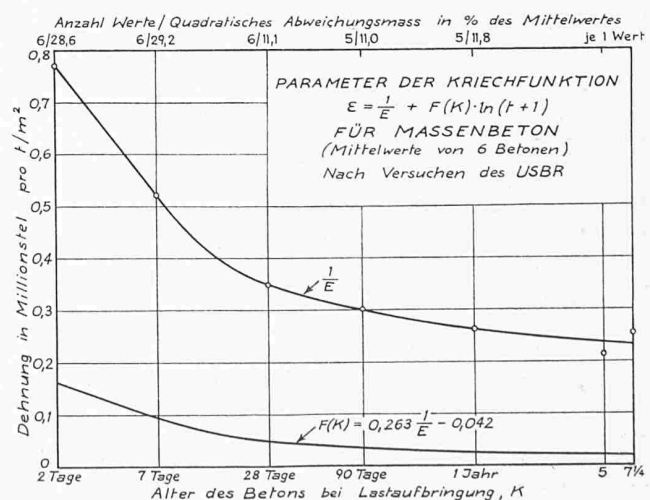


Bild 6. Zeitliche Entwicklung der Kriech-Parameter für Massenbeton

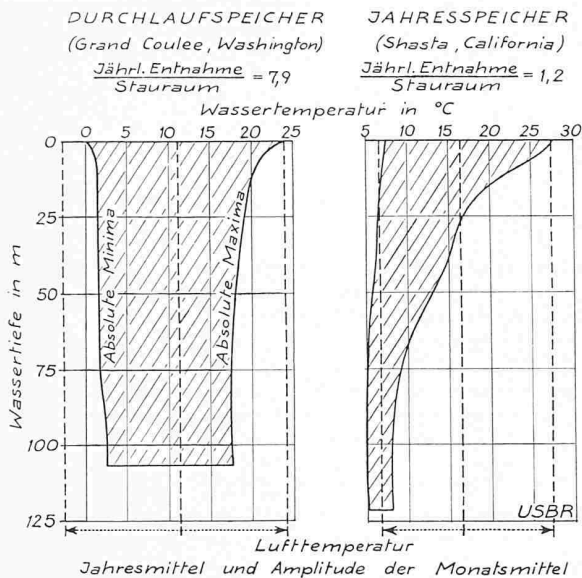


Bild 7. Charakteristische Variation der extremen Wassertemperaturen mit der Tiefe in zwei grossen Stauseen (aus langjährigen Messungen)

betone. Wie die am oberen Rand des Diagramms angegebenen Streuungskoeffizienten zeigen, sind für die vor allem interessierenden höheren Alter die Unterschiede zwischen den einzelnen Betonen nicht grösser als die schon auf einer einzelnen Baustelle ohnehin zu erwartenden Streuungen in der Betonqualität. Eine statistische Analyse der Versuchsergebnisse zeigt ferner, dass sich die Parameter E und F (K) unabhängig vom Alter des Betons eng korrelieren lassen.

In die statische Berechnung der Staumauer Monticello wurden für den Beton ein Elastizitätsmodul von, in noch mehr gefühlsmässiger Berücksichtigung des Kriechens, nur 1760 000 t/m² und eine Querszahl von 0,20 eingeführt. Damit stellt sich also das wesentliche Verhältnis der Elastizitätsmoduli von Beton zu Fels auf 1,9.

3. Temperatur

Die Bedeutung der Temperatureinflüsse für das Verhalten insbesondere von Bogenstaumauern ist unbestritten und wurde schon frühzeitig erkannt. Am Bureau of Reclamation wird deshalb einer möglichst realistischen Erfassung derselben grösste Aufmerksamkeit geschenkt, und bei jedem Projekt sind Messungen der Luft- und Wassertemperaturen, möglichst frühzeitig vor dem eigentlichen Bau beginnend, zu einer Selbstverständlichkeit geworden, wie etwa hydrologische Erhebungen.

Die Lufttemperaturen werden anhand solcher relativ doch kurzfristiger eigener Messungen und langjähriger Erhebungen nächstgelegener Stationen des United States Weather Bureau abgeschätzt. Für die Rechnung selbst ist die Kenntnis der mittleren Jahrestemperatur, der mittleren Monatsmittel und der mittleren und extremen Werte der Extrema in jedem Monat erwünscht. Aus diesen werden nach empirischen Gesetzen die sich überlagernden jährlichen, zweiwöchentlichen und täglichen Temperaturschwankungen ermittelt und als trigonometrische Funktionen dargestellt.

Etwas schwieriger gestaltet sich, wie erwähnt, die Prognose der Wassertemperaturen im zukünftigen Speicher. Ueber teilweise viele Jahre erstreckte, eingehende Temperaturbeobachtungen an zahlreichen Speichern ermöglichen es jedoch, zusammen mit den im zu stauenden Fluss direkt gemessenen Temperaturen, sich ein Bild von den ungefähr zu erwartenden Verhältnissen zu machen. Bild 7 zeigt beispielshalber die Variation der Extremwerte der Wassertemperatur mit der Tiefe in zwei der grösseren Speicher des Bureau of Reclamation, wobei besonders deutlich der Einfluss des Betriebsregimes zum Ausdruck kommt. Bei der Wassertemperatur wird naturgemäss nur die alle andern an Bedeutung weit überragende jährliche Schwankung in der Berechnung berücksichtigt.

Neuerdings wurde auch der Einfluss der Sonnenbestrahlung auf die Temperaturen in Betonstaumauern durch Mes-

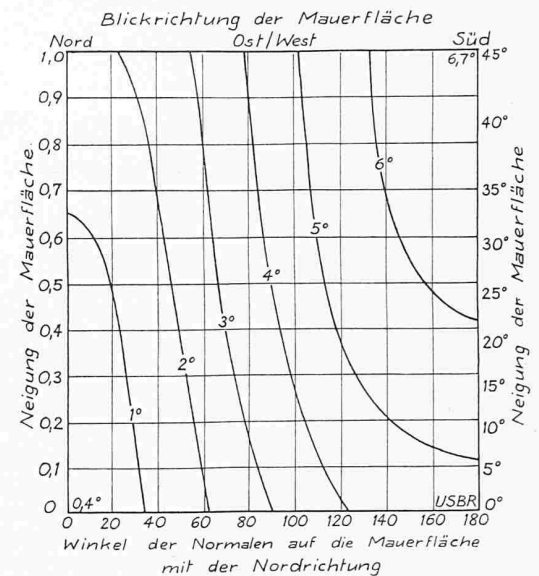


Bild 8. Mittlere Erwärmung der Mauer Oberfläche über die mittlere Jahrestemperatur infolge Sonnenbestrahlung, in °C (Westen der USA, 45 bis 50° nördliche Breite)

sungen und theoretische Untersuchungen studiert. Bild 8 zeigt eines der Diagramme, welche das Resultat dieser Studie darstellen. Damit lässt sich der Einfluss der Sonnenbestrahlung direkt als von der Orientierung und Neigung der Mauer Oberfläche abhängiger Zuschlag zur mittleren Jahrestemperatur der Luft angeben. Die teilweise Beschattung der Staumauer durch die Talflanken ist dabei noch nicht berücksichtigt; dies erfolgt je nach der Topographie der Sperrstelle durch eine prozentuale Verminderung der theoretisch maximal möglichen Temperaturerhöhung, wie sie durch das Diagramm gegeben wird.

Aus den solcherart abgeschätzten äusseren Temperaturen lassen sich nun nach der Theorie der Wärmeleitung⁸⁾ die Temperaturen im Mauerkörper selbst ermitteln. Die hiezu notwendige Temperaturleitfähigkeit des Betons wird am Bureau of Reclamation routinemässig für jeden Massenbeton bestimmt. Sie hängt vor allem von der Petrographie der Zuschlagstoffe, d. h. von der Temperaturleitfähigkeit des betreffenden Gesteins, und in vermindertem Masse auch von der Temperatur selbst ab. Ein guter Mittelwert für Massenbeton mit granitischen Zuschlagstoffen ist 0,004 m²/Std.

Bild 9 zeigt im Diagramm oben links für die Staumauer Monticello auf jeder Kote die der betreffenden Mauerstärke entsprechende Amplitude der mittleren Mauertemperatur, d. h. der mittleren Temperatur über den Querschnitt. Ausgehend von den mit der Röhrenkühlung erreichten Fugenschluss-temperaturen gewinnt man sodann die in die statische Berechnung einzuführenden mittleren Temperaturänderungen. Sehr deutlich zeigt sich hier nun die Wirkung der Unterkühlung, indem sich der grösste Teil des Mauerkörpers beim Uebergang in den «stationären» Zustand nur immer, mehr oder weniger stark, erwärmen wird. Eine Erwärmung wirkt jedoch statisch dem Wasserdruck entgegen. Dadurch können hier die bei den geringen Oeffnungswinkeln der untern Bogen unter Wasserdruck allein unvermeidlichen Zugspannungen an den Kämpfer-Wasserseiten kompensiert werden. Es handelt sich somit um eine Art (thermische) Vorspannung. Selbstverständlich ist dieses Verfahren jedoch nur bei einer relativ hohen mittleren Temperatur der Luft und damit des Mauerkörpers im Endzustand möglich.

Aus nicht ganz erfindlichen Gründen vernachlässigt das Bureau of Reclamation in seinen statischen Berechnungen von Bogenmauern jedoch das Temperaturgefälle von der Wasser- zur Luftseite und umgekehrt (je nach Jahreszeit), obschon dessen Einfluss auf das Spannungsbild von der gleichen Grössenordnung ist, wie derjenige der gleichmässigen Temperaturänderung. Dies erscheint besonders in Fällen mit einem Stauregime wie das des Speichers Monticello, wo die Mauer meist ganzjährig eingestaut bleiben wird, abwegig.

⁸⁾ Cooling of Concrete Dams, Bureau of Reclamation, Boulder Canyon Project Final Reports, Part VII, Bulletin 3, 1949.

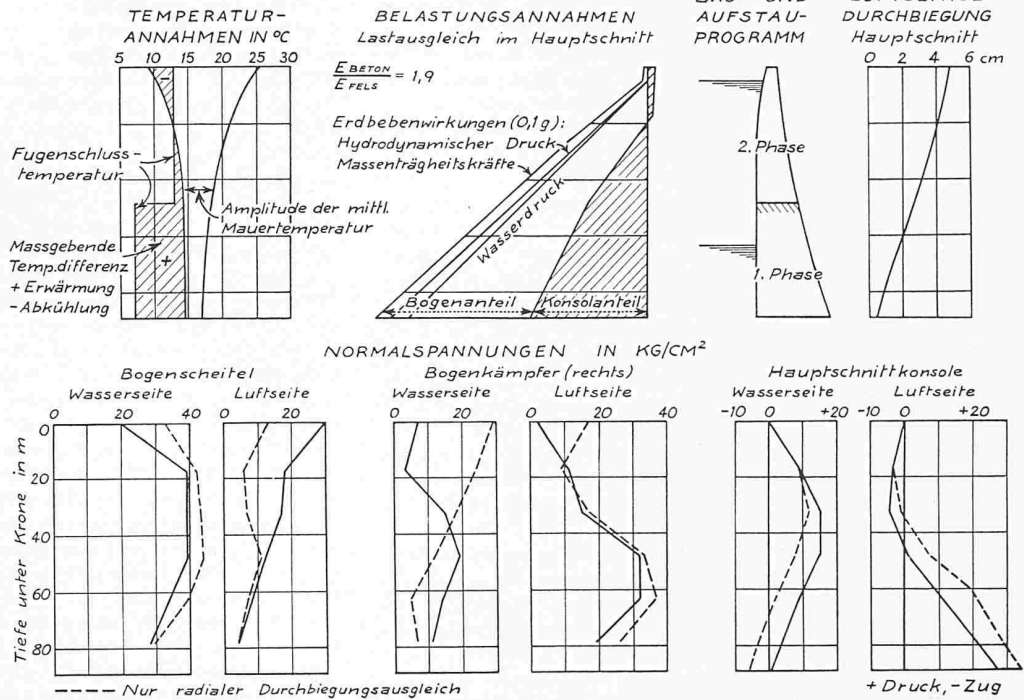


Bild 9. Belastungsannahmen und Resultate aus der statischen Berechnung für die Staumauer Monticello

4. Erdbeben

Es hat sich am Bureau of Reclamation allgemein eingebürgert, Erdbebenwirkungen im Spannungsnachweis von Staumauern mitzubedenken. Im Falle der Staumauer Monticello ist dies sicher angebracht, gehört doch Kalifornien zu den erdbebenreichsten Gegenden der Welt. Die gewohnheitsmässige Einbeziehung dieser Einflüsse ist jedoch sicher abzulehnen, denn schliesslich geht es bei einem Spannungsnachweis nicht um die blinde Aufeinanderstürmung aller nur denkbaren Belastungen. Zudem spielt, wie bereits erwähnt, vor allem auch bei solchen Bewässerungsprojekten, nicht nur die statische Standsicherheit die Hauptrolle, sondern ebenso sehr die wirtschaftliche.

Ganz abgesehen davon, dass gerade in bezug auf Erdbebenwirkungen die Annahmen notwendigerweise noch sehr roh, um nicht zu sagen hypothetisch, sein müssen. Dies betrifft vor allem die Richtung der Bebenbeschleunigung, bzw. die ihr entgegengesetzte Angriffsrichtung der Kräfte auf die Staumauer. Aus Gründen der statischen Erfassbarkeit ist man gezwungen, diese parallel zum Hauptschnitt anzunehmen. Die Bebenbeschleunigung wird gewöhnlich zu 10 % der Erdbeschleunigung angenommen, die Bebenperiode zu einer Sekunde. Dies entspricht etwa einem Beben der Intensität VIII nach Mercalli (1931), bzw. VIII bis IX nach Rossi-Forel. Ein Erdbeben hat auf eine Staumauer zwei statische Wirkungen: Massenträgheitskräfte nach dem d'Alembertschen Prinzip sowie einen hydrodynamischen Ueberdruck infolge des «Aufschlagens» der Mauer gegen die relativ trägeren Wassermassen des Speichers. Für letzteren wird nach Westergaard meist eine parabolische Variation mit der Tiefe angenommen. Neulich wurde die analytische Lösung von Westergaard am Bureau of Reclamation durch elektrische Analogversuche überprüft und für auch nicht lotrechte Mauerwasserseiten erweitert⁹⁾. Die Möglichkeit der resonanten Vibration des Mauerkörpers bei einem Erdbeben wurde anlässlich der Entwurfsarbeiten zur Hoover-Sperre eingehend analytisch untersucht und als kaum in Frage kommend befunden.

5. Auftrieb und Porenwasserdruck

In der Berechnung von Bogenstaumauern, so auch für die Staumauer Monticello, wird die Wirkung des Auftriebs in der Fundamentfläche und des Porenwasserdruckes im Mauerkörper am Bureau of Reclamation gewöhnlich vernachlässigt.

⁹⁾ C. N. Zangar: Hydrodynamic Pressures on Dams due to Horizontal Earthquake Effects, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph No. 11, May 1952.

Obschon man sich des Einflusses dieser Kräfte auf das Spannungsbild, der etwa die Grössenordnung der Temperaturwirkungen erreichen kann, bewusst ist, werden nicht ganz ersichtliche rechnerische Schwierigkeiten als Grund zu dieser Annahme angeführt. Wo ein Auftrieb und Porenwasserdruck berücksichtigt werden, wird deren Intensität folgendermassen angenommen:

Staumauern ohne Drainage: lineare Abnahme vom vollen hydrostatischen Druck an der Wasserseite auf Null, bzw. den vollen hydrostatischen Druck des eventuellen Unterwassers an der Luftseite.

Staumauern mit Drainage: entsprechend den Resultaten der erwähnten Auftriebsmessungen wird die Intensität in der Ebene der Drainage zu einem Drittel der Druckdifferenz Stauunterwasser angenommen, von da wie vorstehend eine lineare Variation zum vollen hydrostatischen Druck an der Wasser- bzw. Luftseite.

Bezüglich des viel diskutierten Flächenfaktors, d. h. des Bruchteils der Querschnittsfläche, auf den der Auftrieb oder Porenwasserdruck wirkt, steht nun fest, dass dieser an die (und für praktische Zwecke genau) 100 % beträgt. Neuere theoretische Ueberlegungen und Versuche, letztere teils am Bureau of Reclamation selbst¹⁰⁾, bekräftigen die schon in den dreissiger Jahren von Prof. K. Terzaghi postulierte Annahme des 100prozentigen Auftriebs. Diese Auffassung vertritt neben dem Bureau of Reclamation selbst z. B. auch der zum Studium der Auftriebsfrage gebildete Spezialausschuss der American Society of Civil Engineers in seinem umfassenden Schlussbericht¹¹⁾.

6. Weitere Belastungsbedingungen

Gelegentlich wird es auch notwendig sein, den zusätzlichen Druck von Schlamm- und Geschiebeablagerungen im Staubecken zu berücksichtigen. Dies hängt naturgemäss stark von der geologischen und topographischen Beschaffenheit des Einzugsgebietes, dem Abflusscharakter und Geschiebeführungsvermögen des Flusses, den Strömungen und Ablagerungs-

¹⁰⁾ D. McHenry: The Effect of Uplift Pressure on the Shearing Strength of Concrete, Transactions Third Congress on Large Dams, Stockholm 1948, Volume I, Report 48.

¹¹⁾ Subcommittee on Uplift in Masonry Dams of the Committee on Masonry Dams of the Power Division: Uplift in Masonry Dams, American Society of Civil Engineers, «Proceedings» Sep. 133, June 1952, oder «Transactions» Vol. 117, 1952, p. 1218 (siehe auch Prof. Dr. Ing. F. Toelke, «Der Bauingenieur», August 1953, Seite 283).

stellen im Stausee selbst und den vorhandenen Spülmöglichkeiten ab. Doch wie schon das ganze Problem der Stauraumverladung selbst, so ist auch die Frage nach dem von solchen Ablagerungen ausgeübten Druck auf eine Staumauer noch ziemlich unklar. Gegenwärtig wird dieser meist als eine Erhöhung des Raumgewichts des Stauwassers eingeführt. In der Berechnung der Staumauer Monticello wurde ein solcher Druck nicht berücksichtigt.

Ebenfalls unberücksichtigt blieb natürlich, angesichts der klimatischen Bedingungen, ein Eisdruck. Doch möge in diesem Zusammenhang auf neuere aufschlussreiche Messungen durch das Bureau of Reclamation an verschiedenen Staumauern in Colorado hingewiesen werden¹²⁾. Ein Druck — bis maximal 30 t/m — der sich bei einem Anstieg der Lufttemperatur ausdehnenden Eisschicht auf den Mauerkörper konnte eindeutig nachgewiesen werden, doch bereitet die Korrelation von Feld- und Laboratoriumsversuchen und die Verallgemeinerung der Resultate einige Schwierigkeit. Selbstverständlich wäre bei einer allfälligen Berücksichtigung eines solchen Eisdruckes auf das voraussichtliche Stauregime gebührend Rücksicht zu nehmen, d. h. auf die Möglichkeit, dass er überhaupt massgeblich zur Wirkung gelangen kann.

Ferner bleiben im allgemeinen auch die sekundären Wirkungen einer Verformung der ganzen Sperrstelle unter dem Druck des Stausees in der Berechnung einer Staumauer unberücksichtigt. Einzig anlässlich des Baues der Hoover-Sperre unternahm man am Bureau of Reclamation Untersuchungen in dieser Richtung, insbesondere auch eine analytische Abschätzung der regionalen Setzungen unter dem Gewicht dieses bisher grössten künstlichen Sees. Die im Mittelpunkt des Senkungsgebietes festgestellte maximale Setzung von 18 cm in den ersten 15 Jahren (bis 1950) vergleicht sich dabei vorteilhaft mit dem unter Annahme, die Erdkruste verforme sich elastisch als kompakte Granitmasse, errechneten Endwert von 24 cm¹³⁾.

B. Berechnungsmethode und Ergebnisse

Zur Berechnung von Bogenmauern und, sofern ihre Kontraktionsfugen ausgepresst werden, auch Gewichtsmauern verwendet das Bureau of Reclamation die von ihm anlässlich der Entwurfsarbeiten für die Hoover-Sperre entwickelte sog. Trial-Load-Methode¹⁴⁾, im Wesentlichen immer noch in derselben Form. Dieses Verfahren ist eine Erweiterung der ursprünglichen Trägerrostmethode, wobei die äussersten Lasten so auf horizontale (Bogen) und vertikale (Konsolen) Elemente des Mauerkörpers aufgeteilt werden, dass nicht nur deren radiale Durchbiegungen übereinstimmen, sondern auch die horizontalen Verdrehungen und tangentialen Verschiebungen. Die Genauigkeit der Methode wurde durch verschiedene Modellversuche zur Hoover-Sperre überprüft, und noch heute ist sie zweifellos eines der besten und raffiniertesten Verfahren zum Spannungsnachweis für Staumauern. Zudem zeichnet sie sich durch eine gute Uebersichtlichkeit aus. Seit dem Bau der Hoover-Sperre verlässt sich denn das Bureau of Reclamation auch vollständig auf diese analytische Methode und verzichtet auf jegliche Modellversuche. Letztere haben trotz ihrer Anschaulichkeit den nach vorstehender Erörterung der Belastungsannahmen nicht unwesentlichen Nachteil, dass es immer schwierig bleiben wird, andere Belastungen als nur den reinen Wasserdruck zu erfassen. Bezüglich der Erfassung der Nachgiebigkeit des Untergrundes dürften beide Methoden etwa gleich hypothetisch sein, denn notgedrungen nehmen sowohl Rechnung als auch Modell den Baugrund als homogen und isotrop an. Demgegenüber weist jedoch die Trial-Load-Methode den Nachteil des grossen Aufwandes an notwendiger Rechenarbeit auf, der vor allem für weniger umfangreiche und nicht über einen Stab reiner Staumauern-Statiker verfügende Projektierungsbureaux schwer ins Gewicht fallen kann. Auch am Bureau of Reclamation selbst erfordert die voll-

ständige Durchrechnung eines einzelnen Entwurfs unter einer Lastkombination rund 3000 Arbeitsstunden. Die Kosten einer solchen analytischen Untersuchung sind also jenen eines Modellversuchs durchaus vergleichbar. Im besonderen Fall des Bureau of Reclamation berührt es jedoch fast paradox, wenn auch heute noch fast ausschliesslich «von Hand» gerechnet wird, wo doch im gleichen Gebäude schon die erwähnte programmgesteuerte elektrische Rechenmaschine zur Verfügung stünde. Denn gerade in der Anpassung der Trial-Load-Methode an diese modernen Mittel liegen sicher ihre besten zukünftigen Möglichkeiten.

Der Berechnung der Staumauer Monticello wurde ein Trägerrost aus sechs Bogen und elf Konsolen zu Grunde gelegt. Die leichte Unsymmetrie des Talprofils wurde in der Berechnung berücksichtigt, doch ist ihr Einfluss auf das Spannungsbild unbedeutend. Wegen des erwähnten grossen Umfangs der Rechenarbeit wurden der Lastausgleich und damit die Spannungen direkt für die als ungünstigste betrachtete Lastkombination ermittelt, was leider die Uebersichtlichkeit ziemlich beeinträchtigt. Zusätzlich zu den vorgängig dargestellten Lastbedingungen wurde auch noch der Einfluss des Bau- und Aufstauprogramms einbezogen. Gewöhnlich bleiben ja die Konsoldeformationen unter Eigengewicht unberücksichtigt, da sie sich vor dem Fugenschluss, d. h. dem Zustandekommen einer Bogenwirkung, vollziehen. Demgegenüber wurden hier nun die Deformationen des untern Mauerteils der ersten Injektionsphase infolge des Eigengewichts des obren Mauerteils der zweiten Phase zwischen Konsolen und Bogen ausgeglichen, woraus sich eine Beanspruchung auch der (untern) Bogen ergab. Aehnliches gilt auch für die Berücksichtigung des stufenweisen Aufstaus. Die so gewonnenen Teilbeanspruchungen wurden superponiert. Bild 9 zeigt einen Teil der Resultate aus der statischen Berechnung der Staumauer Monticello. Unten werden die horizontalen und vertikalen Normalspannungen gegeben. Gestrichelt sind dabei noch die Resultate eines nur radialen Durchbiegungsausgleichs angegeben, wie er zur Abkürzung des Rechenaufwandes oft verwendet wird. Man stellt hier einen ähnlichen Einfluss der nur in der vollständigen Trial-Load-Analyse berücksichtigten Torsions- und Schubwirkungen fest, wie in analogen, allerdings meist eben auf den Lastfall Wasserdruck beschränkten Vergleichen mit Modellversuchen. Entlang dem wasser- und luftseitigen Mauerfuss wurden auch noch die Hauptspannungen nachgewiesen; doch sind deren Extreme in diesem Fall denen der gegebenen Normalspannungen fast gleich und ihr Verlauf normal, weshalb auf eine Wiedergabe hier verzichtet wird. Die grösste Druckbeanspruchung stellt sich somit nach Bild 9 auf rund 40 kg/cm².

C. Zulässige Beanspruchung und «Sicherheitsgrad»

Nach den zurzeit geltenden Kriterien des Bureau of Reclamation soll die grösste Beanspruchung ein Viertel der Jahresfestigkeit des Betons oder aber höchstens 70 kg/cm² nicht übersteigen. Die grösste Beanspruchung bezieht sich dabei auf die ungünstigste — aber nicht unverhältnissmässig unwahrscheinliche — Lastkombination, d. h. meist die Kombination der ständigen Belastungen (Eigengewicht, Normalstau, Temperatur, eventuell normaler Auftrieb und Schlammdruck) mit einer der ausserordentlichen, temporären Lastbedingungen (Hochwasser, versagende Drainage, Erdbeben oder Eisdruck). Die Bestimmung der massgebenden Druckfestigkeit erfolgt an 45 × 90-cm-Zylindern, welche mit der vollen Massenbetonmischung hergestellt und (luftdicht) verschlossen bei der in der Mauer zu erwartenden Temperatur gelagert wurden. Als massgebend gilt jedoch nicht die mittlere Festigkeit, sondern diejenige, welche von 80 % der Proben erreicht oder überschritten wird. Mit dem, für die auf der Baustelle erreichten Festigkeiten üblicherweise angenommenen, eher pessimistischen Streuungskoeffizienten von 15 % heisst dies nach der Wahrscheinlichkeitstheorie, dass das Mittel 115 % des verlangten Minimums betragen muss. Die Bruchwahrscheinlichkeit, d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass eine Probe genau nur die der Beanspruchung entsprechende Festigkeit aufweist, stellt sich dabei übrigens auf 1:10 Millionen, was gemeinhin als Unmöglichkeit bezeichnet wird. Im Falle der Staumauer Monticello muss die Jahresfestigkeit des Betons entsprechend der grössten Beanspruchung von 40 kg/cm² und nach obigen Kriterien einen mittleren Wert von 184 kg/cm² erreichen.

Schluss folgt

¹²⁾ Ice Pressure Against Dams, A Symposium. G. E. Monfore: Experimental Investigations by the Bureau of Reclamation, American Society of Civil Engineers, «Proceedings» Sep. 162, December 1952, oder «Transactions» Vol. 119, 1954, p. 26 (siehe auch Prof. Dr. Ing. F. Toelke, «Der Bauingenieur», Februar 1954).

¹³⁾ J. M. Raphael: Crustal Disturbances in the Lake Mead Area, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph No. 21, August 1954.

¹⁴⁾ Trial Load Method of Analyzing Arch Dams, Boulder Canyon Project Final Reports, Part V, Bulletin 1, 1938.