Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 48 (1956)
Heft: 7-9

Artikel: Gewichtsstaumauern
Autor: Juillard., H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-921503

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: 04.02.2026

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

Gewichtsstaumauern

H. Juillard, Ing. cons., Bern

Nach den Grundbegriffen der Statik beurteilt, kann man die Talsperren in zwei Klassen einteilen: auf der einen Seite die Gewichtsmauern, die äußerlich statisch bestimmt sind, und auf der andern Seite die seitlich eingespannten Mauern, vornehmlich die gewölbten Konstruktionen, die äußerlich statisch unbestimmt sind.

Gewichtsmauern bilden den weitaus am meisten verbreiteten Typ von Talsperren. Sehr allgemein betrachtet, unterscheiden sie sich also von den andern Staumauertypen durch die prinzipiell einfache Annahme, auf welcher ihre statische Berechnung beruht.

Hinsichtlich aller andern Fragen, die der Talsperrenbau stellt, wie die Bauausführung, die Behandlung der Fundamente, die technologischen Eigenschaften des Betons, die Maßnahmen zur Gewährung der Dichtigkeit usw. sind bei den Gewichtsmauern die gleichen grundsätzlichen Probleme wie bei Bogen- oder andern Talsperren zu lösen.

Der Ausdruck Gewichtsmauer definiert bereits das statische System des Bauwerkes. Alle Talsperren, deren Querschnitt ohne seitliche Reaktionen «schwer» genug ist, um nicht von dem darauf wirkenden Wasserdruck umgestürzt zu werden, sind Gewichtsmauern. Die Pfeilerstaumauern fallen auch in diese Kategorie. Es ist aber immer mehr üblich geworden, die Bezeichnung Gewichtsmauer mehr für massive Konstruktionen zu gebrauchen.

Theoretisch betrachtet sollte es nur einen Typ von massiven Gewichtsmauern geben; nachdem hunderte und hunderte von solchen Mauern in der Welt berechnet und erstellt wurden, scheint es, daß die beste Querschnittsform schon längst hätte herausgefunden werden müssen. Tatsächlich bleibt bei normalen Verhältnissen auch kein großer Spielraum für die Phantasie des Konstrukteurs übrig. Hingegen stellen alle Ausführungen von anderen Sperrentypen jedesmal neue Probleme, und jeder Einzelfall verlangt ein eigenes Studium und eine eigene Lösung.

Am letzten internationalen Kongreß der großen Talsperren 1955 in Paris erwähnte ein amerikanischer Teilnehmer, daß der Vorteil der massiven Gewichtsmauern, keine langen Studien vor Beginn der Verwirklichung zu bedingen, und die dadurch gebotene Möglichkeit einen Zeitgewinn zu erzielen, schon manches Mal für die Wahl einer solchen Mauerkonstruktion ausschlaggebend gewesen sei.

Unter diesen Umständen kann man sich fragen, ob es gerechtfertigt sei, in der vorliegenden Serie von allgemeinen Aufsätzen über Talsperren die Gewichtsmauer besonders zu behandeln. Es würde sich dies zweifellos erübrigen, wenn die Analyse sich auf die statischen Eigenheiten der Gewichtsmauern beschränken würde. Das Interesse eines Talsperrentypes liegt aber hier in seiner Entwicklung und seinem Zusammenhang mit den andern Mauerkonstruktionen. Man kann sagen, daß die wesentlichsten theoretischen und die praktischen Erkenntnisse über den Talsperrenbau auf dem Wege des Studiums und der Erstellung von Gewichtsmauern gewonnen wurden.

Die ersten Talsperrenstatiker und ihre Nachfolger waren noch lange der Ansicht, daß die Sicherheit von Gewichtsmauern derjenigen anderer Typen prinzipiell überlegen sei. Noch vor kaum mehr als dreißig Jahren war es noch schwer, mit der Idee durchzudringen, daß die Ausnützung des seitlichen Widerstandes der Talflanken durch eine eingespannte Bogenkonstruktion bei geeignetem Gelände eine wesentlich größere Sicherheit als eine einfache Gewichtsmauer gewähren könne.

Anfänglich getraute man sich nicht, die einfachen Grundregeln der Baustatik, das heißt die Gesetze von Hook und Navier (Proportionalität der spezifischen Deformationen mit den Spannungen und Ebenbleiben der Querschnitte) ohne weiteres auf so große Mauermassen anzuwenden. Auch wurde von Anfang an dem Auftriebsproblem große Beachtung geschenkt und viel darüber diskutiert. Alle diese Fragen, ohne von der Betontechnologie und von der praktischen Bauausführung zu reden, konnten nicht in voller Erkenntnis der wirklichen Verhältnisse beurteilt werden. Sie sind übrigens heute noch nicht ganz gelöst und stellen sich selbstverständlich auch für die andern Typen von Staumauern. Es war aber bei den Gewichtsmauern leichter möglich, sich über die noch mangelnden Erkenntnisse hinweg zu setzen, weil die Gewißheit vorhanden war, daß der Widerstand schon allein durch die eigene unveränderliche Masse des Bauwerkes gewährleistet ist.

Der Bedarf an künstlichen Stauseen für die Speisung von Wasserkraft- oder Bewässerungsanlagen einerseits und die Initiative der Konstrukteure anderseits haben jedoch zu einer gewaltigen Entwicklung sowohl in der Anzahl als im Ausmaß der einzelnen Staumauern geführt. Bei den Gewichtsmauern schien die Extrapolation von kleineren auf immer größer werdende Bauwerke ohne weiteres zulässig, weil nach der einfachen statischen Theorie der Gewichtsmauern alle geometrisch ähnlichen Mauerquerschnitte Beanspruchungen für Eigengewicht und Wasserdruck aufweisen, die direkt proportional zu den Längenmaßen stehen. Mit den zunehmenden Stauhöhen wuchsen auch die maximalen Druckbeanspruchungen in den Mauern. Dieser Umstand führte aber nicht zu erheblichen Schwierigkeiten, indem es immer noch möglich war, Beton von genügender Festigkeit herzustellen.

Das Ergebnis hat dieses Vorgehen gerechtfertigt. Versager waren höchst selten zu verzeichnen und bei den wenigen Unglücksfällen, die es bei Gewichtsmauern gab, stand man nie vor unabklärbaren Fragen, sondern es konnte immer festgestellt werden, daß grobe Fehler begangen worden waren.

Der empfindlichste Punkt einer Talsperre ist im allgemeinen ihre Fundation.

Trotz der erfolgreichen praktischen Entwicklung des Talsperrenbaues waren viele Theoretiker mit der Einfachheit der Berechnung von Gewichtsmauern nicht befriedigt. Sie versuchten die in solchen Konstruktionen auftretenden Spannungen mit Hilfe der mathematischen Elastizitätstheorie zu bestimmen. Ein erstes Ergebnis, das bereits vor Jahrzehnten gewonnen wurde, zeigte, daß unter dem Wasserdruck die Beanspruchung einer Gewichtsmauer mit dreieckigem Querschnitt eine lineare Druck- und Schubspannungsverteilung in ebenen Berechnungsschnitten aufweist, sofern angenommen werden kann, daß das Fundament lediglich als Verlängerung des Sperrenquerschnittes arbeitet. Hiefür sollte es die gleichen elastischen Eigenschaften wie die Staumauer selbst besitzen und ebenfalls eine lineare Spannungsverteilung nach dem gleichen Gesetz wie in irgendeinem höher liegenden Mauerschnitt aufweisen.

Daß diese Annahmen nie genau zutreffen können, ist ohne weiteres klar. Der Vergleich mit den Berechnungsergebnissen der gewöhnlichen Baustatik ist gleichwohl lehrreich. Es zeigt sich, daß die nach der gewöhnlichen Baustatik längs einer Geraden, senkrecht zur wasserseitigen Mauerfläche berechneten Biegungsspannungen richtig sind. Die Schubspannungen hingegen sind nicht gleichmäßig oder parabolisch über einen solchen Schnitt, sondern linear mit Nullpunkt auf der Wasserseite verteilt. Man kann ferner zeigen, daß die Durchbiegung der wasserseitigen Mauerfläche, nach der einfachen Biegetheorie berechnet, ebenfalls genau ist und, was man im ersten Moment nicht erwartet, daß die Schubkräfte keinen Einfluß auf die Durchbiegung ausüben. Hingegen bleiben entgegen der Annahme der gewöhnlichen Baustatik die horizontalen Mauerschnitte nach der Deformation nicht eben; die elastischen Linien von Geraden senkrecht zur Wasserseite sind nach unten konvexe Kurven zweiten Grades.

Aus zwei Gründen kann sich aber in Wirklichkeit das Fundament in elastischer Beziehung nicht einfach als Fortsetzung des dreieckigen Staumauerprofils verhalten: Bereits der Unterschied der Elastizitätsmoduli des Betons und des Felsens würde eine Verschiedenheit der elementaren Deformation in beiden Materialien zur Folge haben und somit in der Kontaktzone sekundäre innere Beanspruchungen hervorrufen, auch wenn das Fundament die geometrische Verlängerung des dreieckigen Mauerprofiles bilden würde. Es treten aber beidseitig des Mauerfußes konzentrierte Reaktionen im Übergang zwischen dem statisch scharf begrenzten Gebiet der Mauer und der unbegrenzten Masse des Fundamentfelsens auf. Die Form der elastischen Linie unter dem Fundament weicht grundsätzlich von derjenigen in einem höher liegenden Mauerschnitt ab. Die Spannungsverteilung im untern Mauerteil wird dadurch wesentlich gestört, wie aus den genaueren Berechnungen hervorgeht. Das Problem wurde unter Annahme einer unendlichen Ausdehnung der Fundamentfläche ebenfalls nach der mathematischen Elastizitätstheorie untersucht (Tölke). Das Ergebnis der sehr umfangreichen Berechnungen, welche die Lösung dieses komplizierten Problems verlangt, zeigt für das Eigengewicht eine starke Druckspannungskonzentration beim wasserseitigen Fuß und für den Wasserdruck eine solche beim luftseitigen Mauerfuß.

Praktisch hat man aber nicht mit einem auf unbegrenzte Distanzen isotropen Fundament zu tun, wie es die Theorie voraussetzt. Unmöglich ist im allgemeinen die Übertragung von horizontalen Zugspannungen im wasserseitigen Fundamentgebiet. Ferner erzeugt die Wasserbelastung auf dem Seeboden vor der Staumauer ein Spannungsfeld von größerer Ausdehnung als die Sperre auf ihr Fundament. Auch wird beim luftseitigen Mauerfuß der Fels nicht immer fähig sein, bereits an der Oberfläche die konzentrierte Schubbeanspruchung zu übertragen, die sich nach der Theorie in diesem Punkt ergeben sollte. Die wirkliche Spannungskonzentration auf beiden Seiten des Fundamentanschlusses einer Staumauer muß also kleiner als nach der mathematischen Theorie ausfallen.

Es ist hier nicht der Ort, auf alle diese interessanten Probleme einzugehen. Aus den gemachten Feststellungen kann aber abgeleitet werden, daß bei Gewichtsmauern die Grenzen, innerhalb welchen die Beanspruchungen aus Wasserdruck liegen, durch die Berechnung zuverlässig ermittelt werden können. Der Umstand, daß die Deformationsverhältnisse im Felsfundament einer Gewichtsmauer nicht genau bekannt sind, spielt im allgemeinen keine Rolle; je nach der Beschaffenheit des Felsens und seiner Behandlung wird die Mauerdurchbiegung mehr oder weniger groß ausfallen, was für die Mauerbeanspruchung gleichgültig ist. Dies trifft aber nur zu, wenn Gewähr vorhanden ist, daß der Fels in elastischer Beziehung homogen ist und wenn die Bauausführung dafür sorgt, daß die Belastung des Fundaments gleichmäßig erfolgt. Das gleiche gilt hinsichtlich der Temperatur- und der im Zusammenhange mit den Zementeigenschaften stehenden Längenänderungen des Fundamentbetons. Eine Nichterfüllung dieser Bedingungen kann zu lokalen Spannungserhöhungen im Fundament führen. Bei der Entwicklung des Talsperrenbaues für immer größere Stauhöhen muß diesem Punkte die größte Bedeutung beigemessen werden.

Die Beobachtung der Deformationen der Gewichtsmauern ist besonders lehrreich. Durch den Umstand, daß das statische Problem äußerlich bestimmt ist, scheint zunächst, daß aus der Mauerdurchbiegung die elastischen Eigenschaften des Sperrenmauerwerkes direkt abgeleitet und hiermit wertvolle Angaben für die statische Berechnung von äußerlich statisch unbestimmten Sperrenkonstruktionen gewonnen werden können. Bei den ersten Beobachtungen von Sperrendeformationen, deren Zweck selbstverständlich noch nicht so bestimmt sein konnte, ging man noch von der Annahme aus, daß die Felswiderlager in der Nähe einer Staumauer weder unter dem Einfluß der Mauerreaktionen noch unter der Belastung des Stausees in Betracht kommende Verschiebungen erleiden können. Auch wurde dem Einfluß der Temperaturveränderungen im Sperrenmauerwerk selbst auf die Deformationen wenig Beachtung geschenkt. So kam es, daß man sich bei den meisten Gewichtsmauern damit begnügte, einzelne Sperrenpunkte von Beobachtungssockeln aus anzuvisieren und durch Wiederholung der Beobachtungen bei leerem und bei vollem Seebecken die erfolgten Änderungen festzustellen. Man erhielt auf diese Art zu spärliche Angaben, um das elastische Verhalten des Bauwerkes zu charakterisieren. Ferner war die Interpretation der Resultate dadurch erschwert, daß die Umgebung von Staumauern, auf welche die Beobachtungspfeiler aufgestellt

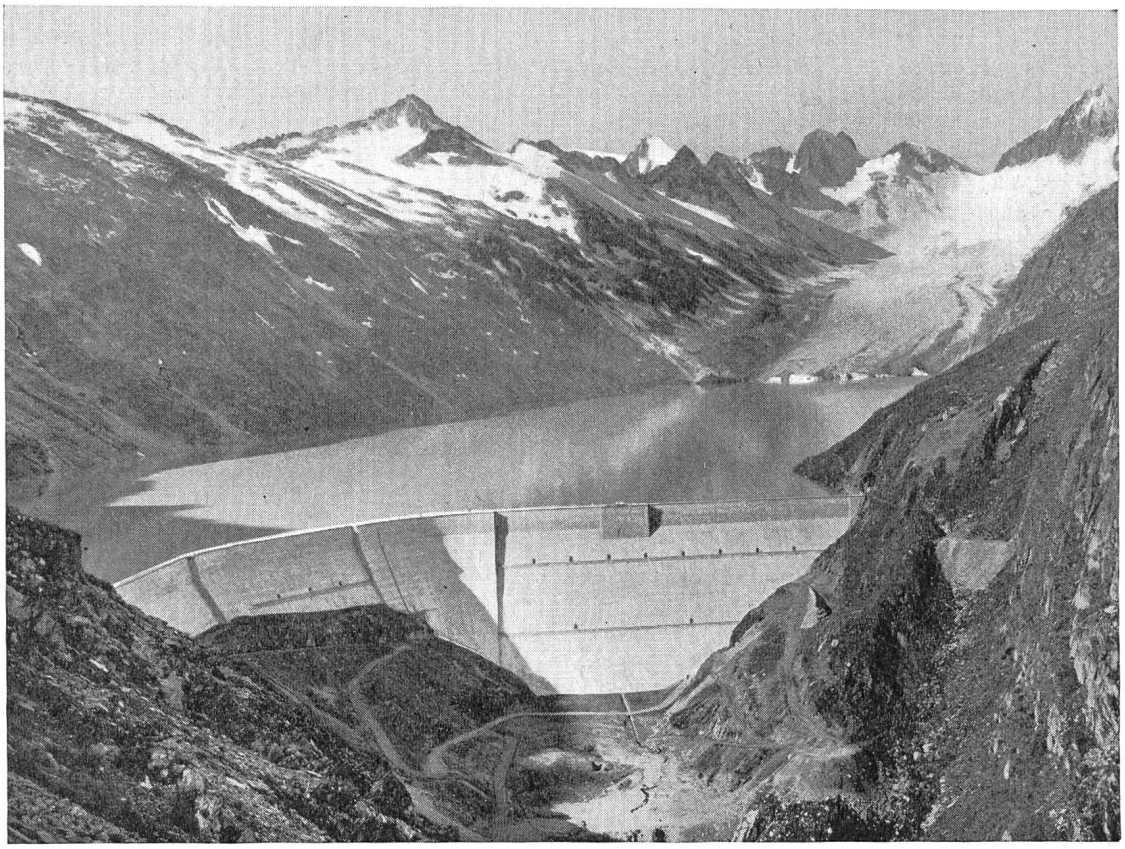

Abb. 1 Staumauer Oberaar

werden können, in der Regel Verschiebungen erleiden, die nicht vernachlässigt werden dürfen.

Erst mit der Anwendung der Meßpendel — die erste Einrichtung funktioniert ab 1931 in der massiven Bogenmauer auf der Grimsel — wurde es möglich, die Änderungen der Durchbiegung eines vertikalen Mauerschnittes im Verlaufe der Zeit einwandfrei zu verfolgen. Durch Einschaltung einer genügenden Anzahl Zwischenpunkte auf der Pendelhöhe kann die Durchbiegungslinie genau gezeichnet und daraus der Anfangswinkel, d. h. die Fundamentdrehung, gut bestimmt werden. Hingegen müssen die horizontalen und vertikalen Bewegungen des Pendelfußpunktes durch andere Meßmethoden ermittelt werden. Interessant für die Statik der Staumauer sind vor allem die Differenzen dieser Bewegungen von einem Fundamentpunkt zum andern.

Die Erkenntnis, daß Talsperren Fundamentdeformationen von wesentlicher Bedeutung aufweisen können und das Bedürfnis, sie zu kontrollieren, sind noch jung. Um die Größe der unter dem Stauseedruck in Sperrfundamenten auftretenden Bewegungen zu ermitteln, war es zuerst notwendig, eine geeignete Beobachtungsart derselben zu entwickeln. Bevor die Meßresultate der allgemeinen Talsperrenwissenschaft dienen können, müssen sie durch genügende Wiederholungen der Beobachtungen und Analyse der maßgebenden Verhältnisse kontrolliert werden. Aus diesen Gründen ist es verständlich, daß bis jetzt wenig über positive Ergebnisse von Fundamentdeformationsmessungen bekanntgegeben wurde. Am letzten Talsperrenkongreß in Paris wurden nur einige Mitteilungen darüber gemacht.

Die Verfolgung der Fundamentbewegungen unter der Mauer selbst ist äußerst schwierig. Praktisch sind die Messungen nur in Gängen möglich. Es ist aber zu beachten, daß möglicherweise die Spannungsverteilung und die Verformung durch das Vorhandensein eines solchen Ganges lokal gestört werden können. Die Angaben von im Beton eingebetteten, einzelnen Meßapparaten, die als Fremdkörper wirken, sind unzuverlässig. Nur Instrumente mit großer Meßbasis oder besser lückenlose Messungen auf große Distanzen können als einwandfrei betrachtet werden und somit den großen Arbeitsaufwand rechtfertigen, den die Durchführung und die Auswertung von solchen Messungen verlangen, um zu einem schlüssigen Ergebnis zu gelangen.

Im obern Teil einer Gewichtsmauer sind die temperaturbedingten Änderungen der Mauerdurchbiegungen ebenso groß wie in einer Gewölbemauer. Hiefür maßgebend ist der Temperaturunterschied zwischen Luft- und Wasserseite. Beim raschen Anstieg von kaltem Seewasser kann eine momentan seeseits gerichtete Mauerbewegung wahrgenommen werden. Die gleiche Erscheinung kann aber zufolge der Belastung des Seebodens auftreten. Sie wurde in einzelnen Fällen (zwar Bogenstaumauern) durch eine Drehbewegung der Felswiderlager bis hoch über der Mauerkrone gegen die Wasserseite während der Seefüllung festgestellt.

Aus diesen verschiedenen Angaben, über welche hier leider nicht detaillierter eingegangen werden kann, geht

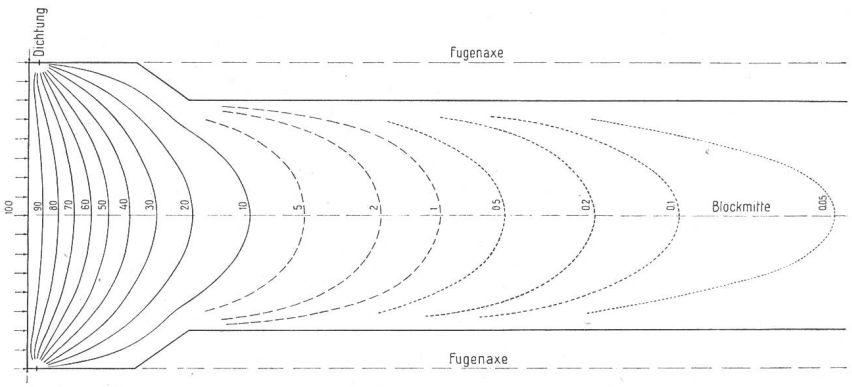

Abb. 2 Talsperre mit Fugen-Aussparungen: prozentualer Auftrieb im Horizontalschnitt eines Sperrenelementes unbegrenzter Länge

bereits hervor, daß, trotzdem die Gewichtsmauern statisch sehr einfache Objekte zu sein scheinen, die Abklärung der Ursachen ihres elastischen Verhaltens bereits komplizierte Probleme stellt.

Eine regelmäßige Kontrolle der Deformationen in einigen Hauptschnitten einer Gewichtsmauer ist von großem direktem und indirektem Interesse. Der Fall einer Abschwächung der Talsperrenkonstruktion im Verlaufe der Jahre ist bei der relativ geringen Beanspruchung der Gewichtsstaumauern wenig wahrscheinlich. Normaler, massiver Talsperrenbeton zeigt an sich keine Tendenz zu mit den Jahren fortschreitenden Deformationen; immerhin würde beispielsweise eine Zunahme des Auftriebes im Beton einen merkbaren Einfluß auf die Mauerdurchbiegung ausüben. Eine allgemeine Zunahme der letzteren wird aber im allgemeinen eher auf das Verhalten des Fundamentes zurückzuführen sein. Unelastische Verformungen im Felsfundament sind anläßlich der ersten Belastungen zu gewärtigen. Nach einer längeren Stabilitätsperiode scheinen jedoch Veränderungen der Fundamentdeformationen zufolge einer weiter- oder näherliegenden Ursache — Änderung der Auftriebsverhältnisse oder der Temperatur im Fels der Sperrenumgebung, allmähliche Bewegungen der Erdkruste und Erdbeben — nicht als à priori ausgeschlossen.

Neben der bedeutungsvollen Wichtigkeit der Verfolgung der Staumauerdeformationen hinsichtlich der Bauwerksüberwachung liegt ein sehr großes Interesse in den Ergebnissen solcher Messungen für die Abklärung von heiklen Fragen, welche die immer weiter fortschreitende Entwicklung des Talsperrenbaues hinsichtlich der Beanspruchung der Bauwerke und der Benützung von weniger günstigen Terrainverhältnissen erfordert. Es wäre deshalb außerordentlich wünschenswert, daß mehr Beobachtungen von Sperrenfundamentdeformationen vorgenommen würden, und zwar hauptsächlich bei den Objekten, deren Statik sozusagen in erster Linie vom elastischen Verhalten des Fundamentes abhängt.

Bei der konstruktiven Ausbildung der massiven Gewichtsmauern sind die Möglichkeiten einer Verwertung der neuen, durch die Beobachtung von bestehenden Sperren gewonnenen Erkenntnisse naturgemäß begrenzt. Die Lage der Resultierenden aus dem Seewasserdruck und dem Eigengewicht der Mauer läßt sich nicht durch eine wesentlich andere Massenverteilung verschieben. Immerhin hat die Verfolgung der verschiedenen sich stellenden Probleme dem Verfasser gezeigt, daß es möglich ist, einige vorteilhafte Änderungen zum klassischen Gewichtsmauertyp anzubringen. Sie wurden bei den Sperren in Rätherichsboden und Oberaar (Abb. 1) angewendet, und die Albignastaumauer wird auch nach diesem modifizierten Typ ausgeführt. Bezweckt wird die gleichzeitige Ausnützung der Hauptvorteile der massiven und der aufgelösten Mauerkonstruktionen, was durch Ersatz der normalen Dilatationsfugen der Gewichtsmauern durch Fugenkammern von 3—5 m Breite erreicht wird. Die Rätherichsboden- und Oberaarsperren wurden in der Schweizerischen Bauzeitung 1952 August/Dezember näher beschrieben.

In statischer Hinsicht dienen die Fugenaussparungen vor allem zu einer wesentlichen Reduktion der Auftriebskräfte, wie aus Abb. 2 hervorgeht, und gestatten eine entsprechende Reduktion des gesamten Maueranzuges. Bei der Oberaar betrugen die Kubaturersparnisse durch die Fugenhohlräume und den reduzierten Maueranzug insgesamt 14% gegenüber einer klassischen Lösung.

Konstruktiv bestehen ferner weitere wesentliche Vorteile der zugänglichen Fugen in der Ermöglichung der Mauer- und Fundamentkontrolle sowie der nachträglichen Behandlung von eventuellen Undichtigkeiten und in der gleichmäßigen Verteilung der Temperaturen. Schließlich erwies sich die getroffene Fugenanordnung bei der Bauausführung als vorteilhaft, indem sie gestattete, an beidseits einer Fuge liegende Blöcke gleichzeitig auf gleicher Höhe zu betonieren und somit die Betoninstallation voll auszunützen, was zur Verkürzung der Bauzeit beitrug.

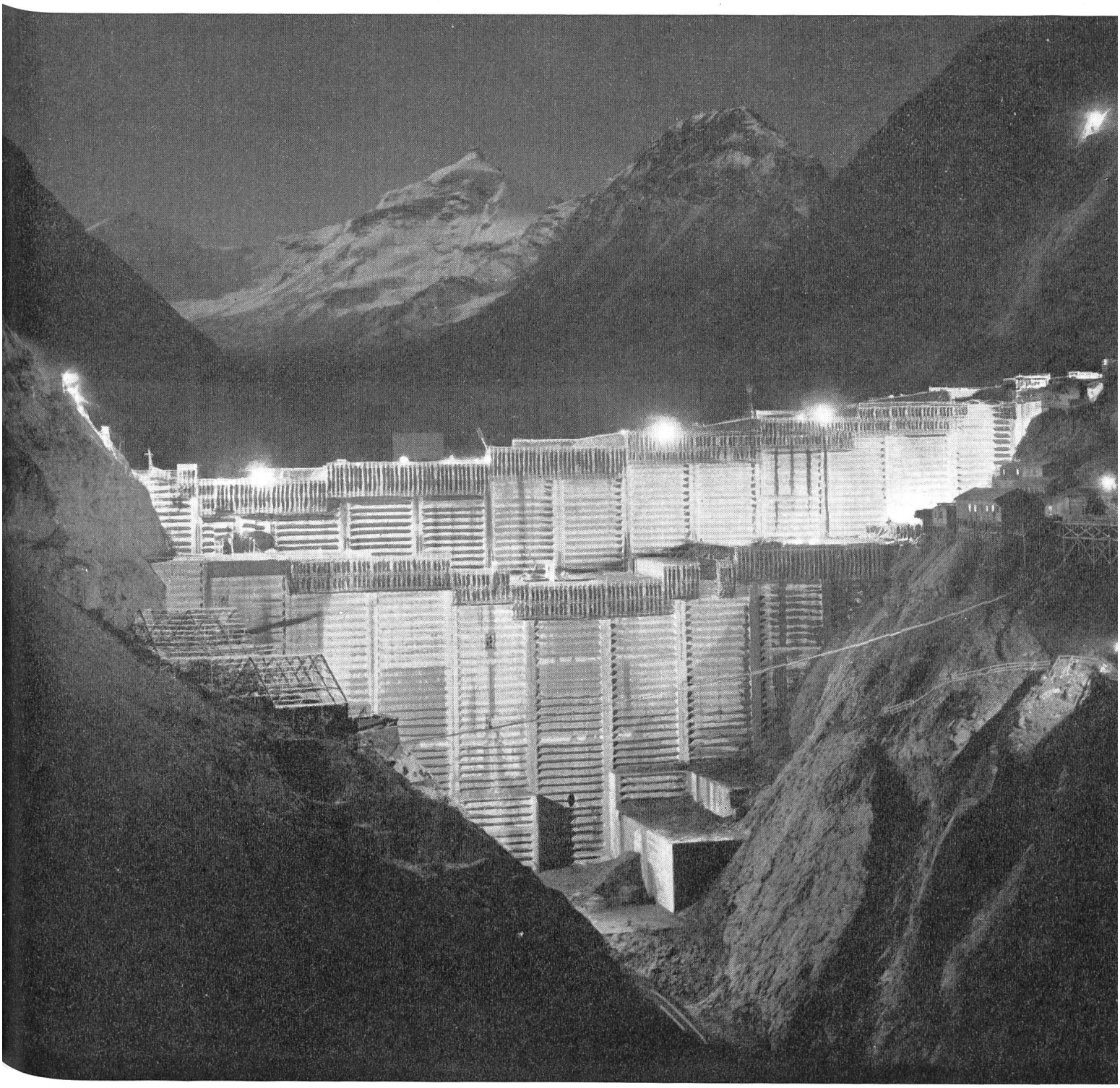

Photo Frank Gygli, Arbaz s/Si

Barrage de la Grande Dixence (Valais)

barrage-poids, volume total de béton 5 890 000 m³, hauteur maximum sur fondations 284 m, longueur du couronnement environ 700 m, cote du couronnement 2364 m s. m., période de construction 1951—1965