**Zeitschrift:** Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie

**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

**Band:** 64 (1972)

**Heft:** 3

**Artikel:** Das Wasserkraftwerk Inguri im Kaukasus mit der höchsten Bogenstaumauer

**Autor:** Grigoriewitsch Gwelessiani, Lewan

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-920949

**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:** 23.08.2025

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

# DAS WASSERKRAFTWERK INGURI IM KAUKASUS MIT DER HÖCHSTEN BOGENSTAUMAUER

DK 621.221 : 627.8 (47)

Prof. Lewan Grigoriewitsch Gwelessiani,
Tbilissi, Wissenschaftliches Forschungsinstitut für Hydroenergie und Wasserbau

Bemerkung der Redaktion:

Anlässlich der Welt-Energie-Konferenz von 1968 in Moskau hatte ich an der anschliessenden Studienreise durch Transkaukasien u.a. auch die Gelegenheit, das sehr interessante Wissenschaftliche Forschungsinstitut für Hydroenergie und Wasserbau in der georgischen Hauptstadt Tbilissi zu besuchen, wo uns Professor L. G. Gwelessiani, der damalige Vizedirektor dieses Instituts, führte und die nötigen Erläuterungen vermittelte (Berichterstattung siehe WEW 1969 S. 112/125). Dank dieses persönlichen Kontaktes ist es uns nun möglich, einen Originalbericht aus der UdSSR über eine besonders interessante Wasserkraftanlage am Inguri im Kaukasus und über die im Bau stehende höchste Bogenstaumauer der Welt zu publizieren. Besonderen Dank schulde ich Ing. N. Schnitter, der sich der Mühe unterzogen hat, die von A. Böttcher erfolgte Uebersetzung mit grosser Sorgfalt zu überprüfen.

G. A. Töndury

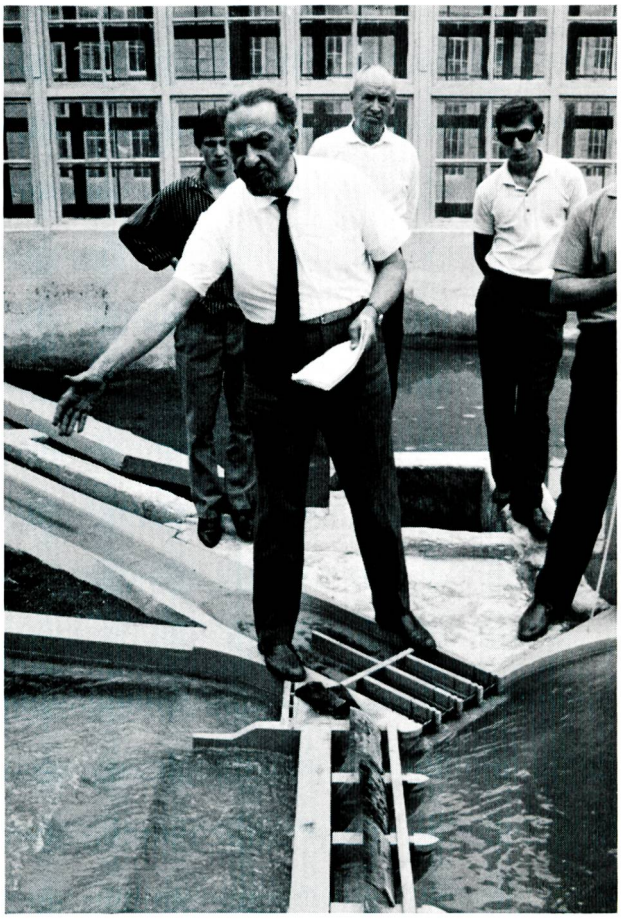
In den Bergen der Georgischen Sozialistischen Sowjetrepublik befinden sich am Fluss Inguri, der am kaukasischen Hauptgebirgsgrat entspringt, bedeutende Wasserkraftanlagen im Bau, mit überaus interessanten und originellen Bauwerken. Dieser Artikel gibt die Charakteristiken der Wasserkräfte Georgiens sowie eine Beschreibung des Flusses Inguri und seiner hydroelektrischen Nutzung, des Kraftwerkes Inguri und der wissenschaftlichen Untersuchungen, welche unternommen wurden oder noch im Gange sind für die Projektierung und Erstellung des Kraftwerkes.

Die Natur hat Georgien reichlich mit ihren Gaben beschenkt, doch die «Weisse Kohle» nimmt unter allen Naturschätzen einen besonderen Platz ein. Dies erklärt sich aus der grossen Mannigfaltigkeit der natürlichen Gegebenheiten Georgiens mit seinem ausgedehnten und verzweigten Flussnetz, Niederschlagsreichtum (besonders in West-Georgien) und Hochgebirgsrelief. Die bedeutenden Gefälle der Flüsse und ihre Abflussmengen bedingen deren hohes hydroelektrisches Potential. Um dasselbe für ganz Georgien sowie einzelne Abschnitte festzustellen, wurden 319 Flüsse untersucht, wovon 208 mittlere und grosse. Die Ergebnisse zeigten, dass Georgien im Jahresdurchschnitt über eine potentielle Leistung von 15 500 MW verfügt, was einer durchschnittlichen Energieproduktion von 135 TWh/Jahr entspricht. Das ist ein gewaltiges und eindrucksvolles hydroelektrisches Potential! Allerdings ist ein grosser Unterschied in dessen Verteilung auf das östliche und westliche Georgien festzustellen. Gebietsmässig sind beide Teile annähernd gleich gross, doch verfügt das westliche Georgien über 70 % des Energiepotentials, das heisst, über zirka 96 TWh/Jahr. Dieses hohe hydroelektrische Potential West-Georgiens lässt sich, wie oben erwähnt, erklären aus den riesigen Niederschlagsmengen und der Nähe des Schwarzen Meeres zum kaukasischen Hauptgebirgsgrat, dem die grössten Flüsse West-Georgiens entspringen und auf kürzestem Wege von den Höhen des Ewigen Schnees und der Gletscher bis zum Meeresspiegel hinabfliessen.

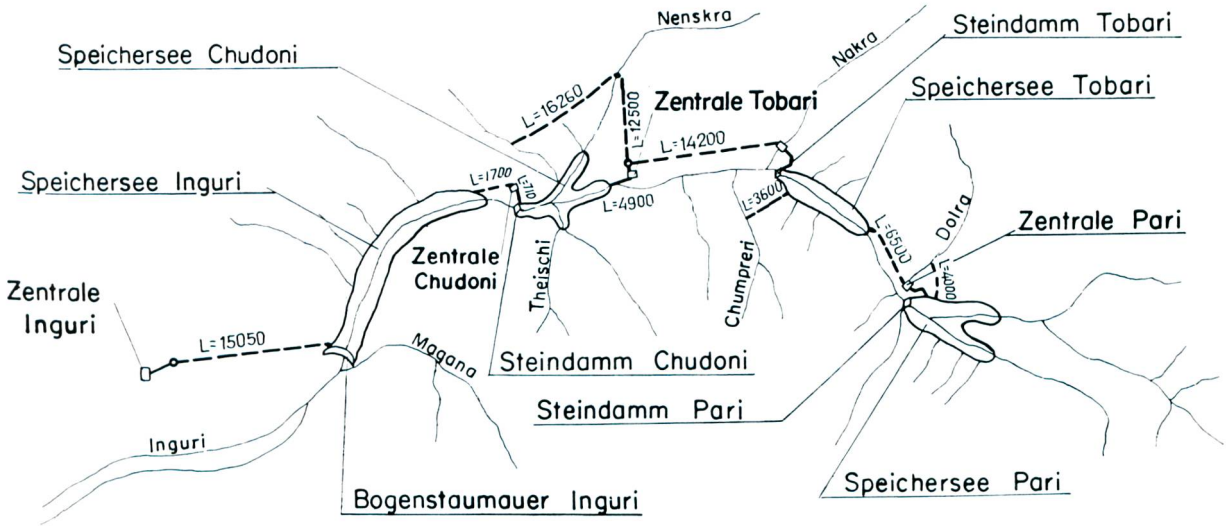
Ungefähr drei Viertel (71 %) der Wasserkraft Georgiens sind in fünf Hauptflüssen und deren Nebenflüssen konzentriert, das heisst, in den Becken der Flüsse Rioni (30,5 TWh = 22 %), Kura (22,6 TWh = 17 %), Inguri (21,0 TWh = 16 %), Kodori (13,5 TWh = 10 %) und Bsibj (8,2 TWh = 6 %), die somit zusammen zirka 100 TWh/Jahr erzeugen können. Nimmt man die Hauptflüsse ohne die Nebenflüsse, so hat der Inguri den Vorrang, da er allein ein Leistungsvermögen von zirka 1500 MW hat. Für die übrigen Flüsse lauten die Zahlen entsprechend:

| | |
|---|---|
| Kura (in Georgien) | 1140 MW |
| Rioni | 1030 MW |
| Zchenis-Zkali (Zufluss des Rioni) | 610 MW |
| Kodori | 610 MW |
| Bsibj | 530 MW |

Bild 1 Professor L. G. Gwelessiani erläutert einer Gruppe der Studienreise «Transkaukasien» der Welt-Energie-Konferenz Moskau 1968 die Modellversuche für das grosse Kraftwerk Inguri im Kaukasus. (Photos G. A. Töndury)



## SCHEMA DES AUSBAUES DES MITTELLAUFES DES INGURI




## LÄNGENPROFIL DER KW STUFEN AM MITTELLAUF INGURI

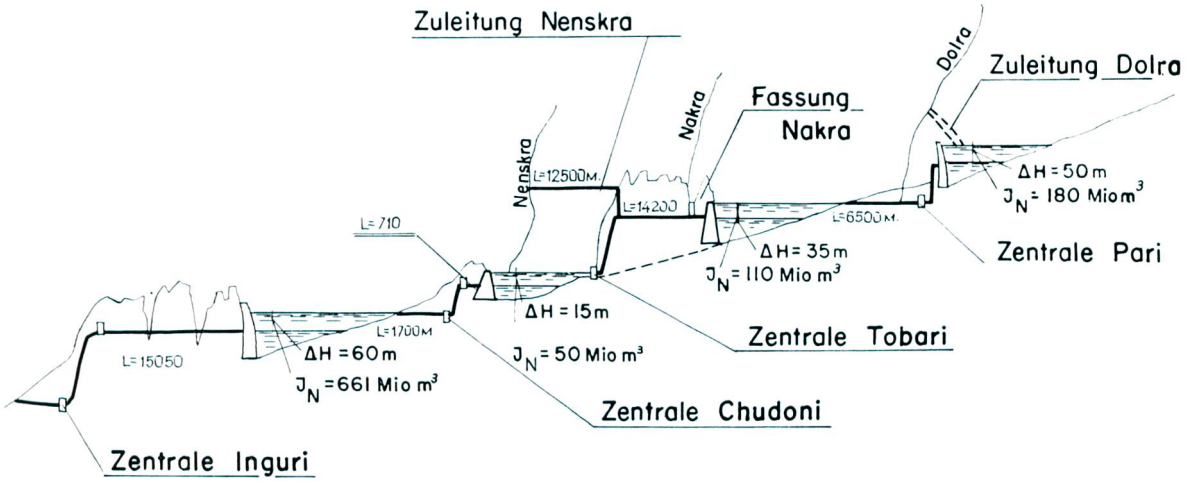



Bild 2 Ausbauschema am Mittellauf des Inguri-Flusses im Kaukasus.

Besonders hoch sind in Georgien die Leistungswerte bzw. das Energiepotential pro km Flusslänge oder pro km² Oberfläche. Dieser letzte Wert, der die mittlere hydroelektrische Dichte des ganzen Territoriums charakterisieren kann, beträgt bei einer Fläche von zirka 70 000 km² beinahe 2 GWh/km² · Jahr, — eine Rekordzahl für die ganze UdSSR und einer der höchsten Werte in der Welt! Jedoch ist diese Zahl noch nicht die Grenze, sondern stellt den Durchschnittswert für die ganze Republik dar. In einzelnen Bezirken ist sie noch bedeutend höher und erreicht zum Beispiel in den Becken der Flüsse Bsibj, Kodori und Inguri Spitzenwerte von 5 bis 6 GWh/km² · Jahr.

Die obenerwähnten Werte des Vorrats an «Weissen Kohlen» stellen die theoretisch möglichen potentiellen Vorräte an Wasserkraft dar, während die technischen und praktischen Auswertungsmöglichkeiten nur etwa die Hälfte der obengenannten Zahlen betragen. Die technisch verwertbaren Wasserkräfte der Republik Georgien werden auf 68,5 TWh/Jahr geschätzt — auch eine sehr grosse Zahl.

Vergleicht man Georgien mit anderen Republiken der Sowjetunion nach der absoluten Grösse des hydroelektrischen Potentials, so nimmt sie den vierten Platz ein (nach der Russischen Sozialistischen Föderativen Sowjetrepublik, Tadshikistan und Kasachstan). Gemessen an den technisch nutzbaren Vorräten an «Weisser Kohle» nimmt sie aber den dritten Platz ein, nach der RSFSR und der Tadshikischen Sozialistischen Sowjetrepublik. Dies ist der Stand der Wasserkräfte in Georgien und deshalb sind wir völlig berechtigt, Georgien die reichste Republik an «Weisser Kohle» zu nennen, was auch die Zweckmässigkeit einer breiten Entwicklung des Baues grosser Wasserkraftanlagen, in erster Linie auch am Flusse Inguri, rechtfertigt.

### 1. Der Fluss Inguri und sein Ausbauplan

Der Fluss Inguri — einer der ausserordentlich interessanten und mächtigen Flüsse Georgiens — ist zirka 220 km lang von seinem Ursprung an den südlichen Abhängen des kau-

kasischen Hauptkammes bis zu seiner Mündung ins Schwarze Meer. Er gehört zu den Flüssen mit einer gemischten Versorgung: Gletscher-, Regen- und Grundwasser. Vom gesamten Einzugsgebiet von 4060 km² liegen 79 % über 1000 m ü.M. Die gesamte Fallhöhe des Flusses beträgt 2600 m (auf einzelnen Strecken erreicht das Gefälle bis 4 %), wovon auf die energiewirtschaftlich interessantesten mittleren und unteren Teile des Flusses zirka 900 m entfallen. Das hydroelektrische Potential des Inguri übersteigt 12 TWh/Jahr, wovon 9 TWh/Jahr mit hoher Effizienz realisierbar sind. Die spezifischen Leistungen sind ausserordentlich hoch und übersteigen 10 MW/km. Sie erreichen in einzelnen Abschnitten 14 MW/km. Der langjährige mittlere Abfluss im unteren Teil der Kraftwerkanlagen beträgt 156 m³/s und das beobachtete Maximum 950 m³/s. Die rechnerischen Hochwasserabflüsse wurden zu 930 m³/s mit 5 % Wahrscheinlichkeit und 2120 m³/s mit 0,1 % Wahrscheinlichkeit ermittelt.

Der geologische Aufbau des Flussbeckens ist vielfältig. Im Gebiet der projektierten Wasserkraftanlagen sind vorhanden: Porphyrit, Kalke aus der Kreidezeit und praktisch wasserdichte Schiefer von hoher Festigkeit. Verkarstungen im Kalk finden sich nur bedeutend höher als das Baugebiet der Kraftwerkanlagen und nur in geringen Tiefen an den Talflanken (nicht tiefer als 10 bis 15 m). Das geringe Alter der Schlucht des Flusses und die Festigkeit des Gesteins bewirkten eine grosse Steilheit der Abhänge und zahlreiche Verengungen. Hier ist es möglich, hohe Talsperren mit guten wirtschaftlichen Kennziffern zu errichten. Eine solche Verengung befindet sich etwas vor der Einmündung des Flusses Magana (letzter grosser Zufluss), in der Nähe des Austritts des Flusses Inguri aus der Schlucht in die Küstenebene. Das Inguribecken und insbesondere die Sperrstelle gehören zu der seismischen Zone der Intensität VIII (nach Mercalli).

Diese Schluchtverengung, die den Namen Djwar trägt, gestattet es, eine hohe Bogenstaumauer zu errichten und dadurch einen Speicher für die Jahresregulierung des Abflusses des Inguri zu bilden. Die Nutzung der Fallhöhe unter dieser Schluchtverengung erfolgt am zweckmässigsten durch Umleitung des Wasserdargebots des Flusses Inguri in den benachbarten kleinen Fluss Eris-zkali, der unmittelbar in das Meer mündet. Auf diese Weise erhält man eine konzentrierte Verwertung der Fallhöhe durch das im Bau befindliche Kraftwerk Inguri, ein wichtiger Bestandteil im Gesamtplan zur Nutzung des Flusses. Dieser sieht vor, oberhalb des Kraftwerkes Inguri noch drei Kraftwerkstufen zu errichten, im wesentlichen unter Ausnutzung der Fallhöhen mittels Ableitstollen oder teilweise mittels Talsperren und der dadurch entstehenden Saisonspeicher. Nach Verwirklichung des Planes wird die Erzeugung aller Kraftwerkstufen in beträchtlichem Masse ausreguliert sein. Zurzeit wird noch an der Präzisierung des Gesamtplanes für die Nutzung des Flusses Inguri gearbeitet. Gemäss dem aufgezeichneten und teilweise schon realisierten Plan weist der Fluss Inguri folgende Kennzeichen auf:

a) ist er eine der leistungsfähigsten Quellen für Wasserkraft in Georgien;

b) ermöglicht er die Errichtung der für georgische Verhältnisse grössten Anlagen mit guten wirtschaftlichen Kennziffern; und

c) gestattet er den Bau von Speicherbecken, die das Betriebsregime der Kraftwerke wesentlich verbessern.

## 2. Beschreibung des Kraftwerks Inguri

Das Kraftwerk befindet sich in einer besiedelten Gegend mit mildem Klima: mittlere Jahrestemperatur +14 °C, minimales Monatsmittel +5 °C, maximales Monatsmittel +23 °C, Anzahl der frostfreien Tage 287 pro Jahr und Jahresniederschlag im Mittel 2100 mm. Das Hauptbauwerk der Anlage ist die Bogenstaumauer in der Djwarschlucht unweit der Stadt Sugdidi, die einen grossen Stausee («Das Ingurische Meer») bildet mit einem Inhalt von über 1100 Mio m³. An die Wasserfassung schliesst ein Druckstollen grossen Durchmessers an, der in einem Zweikammer-Wasserschloss endet. Nach demselben verzweigt sich der Stollen in zwei Druckschächte, die das Wasser den fünf Einheiten des unterirdischen Kraftwerks Inguri zuleiten. Dessen Leistung beträgt 1300 MW und die Jahresproduktion 4,5 TWh.

Als Talsperre wurde eine Bogenstaumauer gewählt, da dieser Typ als der fortschrittlichste und rationellste angesehen werden kann. Sie ist doppelt, das heisst, sowohl im Grundriss wie im Aufriss gekrümmt und mit ihrer Höhe von 271,5 m einzigartig in der Welt und eine Rekordlei-

Bild 3 Schematischer Generalplan des Kraftwerks Inguri.

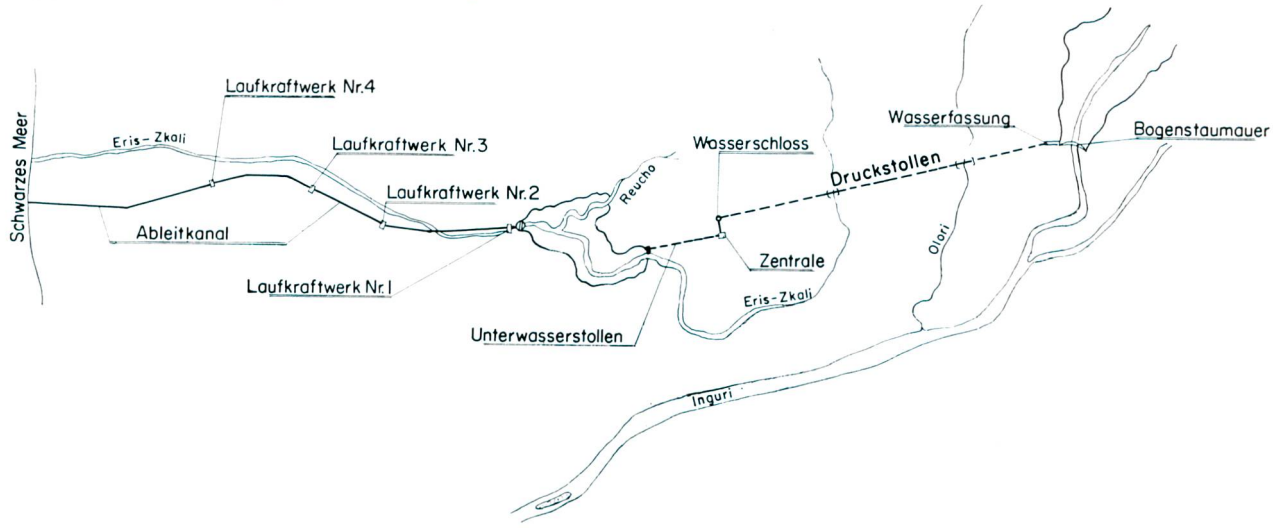


Bild 4

LAGEPLAN DER STAUMAUER

Erläuterungen zu diesem Lageplan:

1 Staumauerkörper
2 Zwischenablässe
3 Grundablässe
4 Umleitstollen
5 Wasserfassung
6 Druckstollen
7 Zugangsstollen zu den Sicherheitsabschlüssen
8 Sicherheitsabschlüsse
9 Linkes Widerlager
10 Unterirdische Verstärkung
11 Injektionsstollen
12 Drainagestollen
13 Zugangsstollen

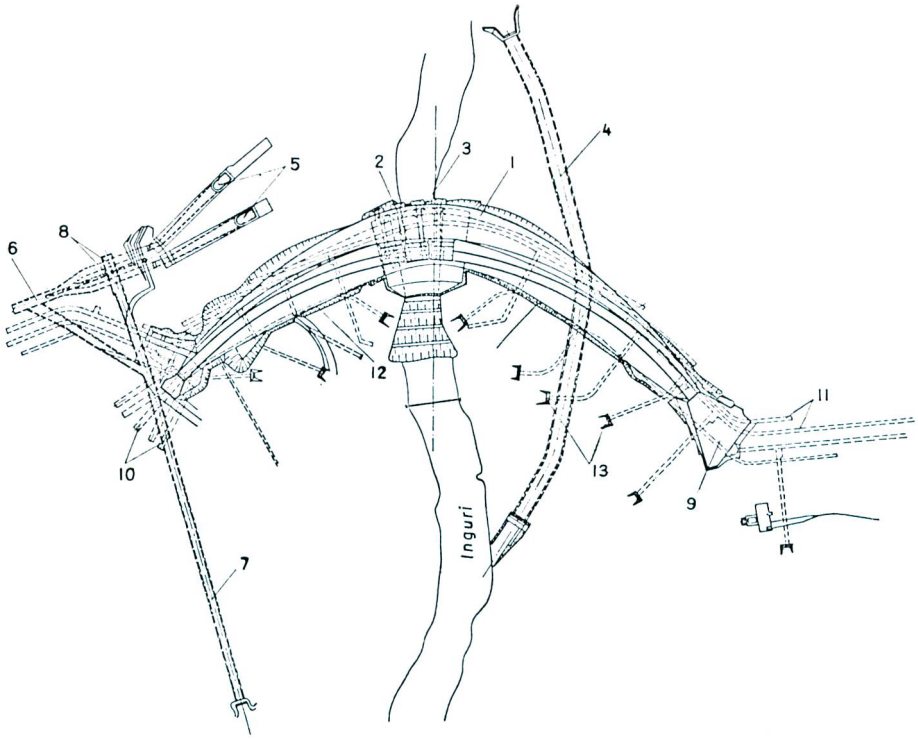
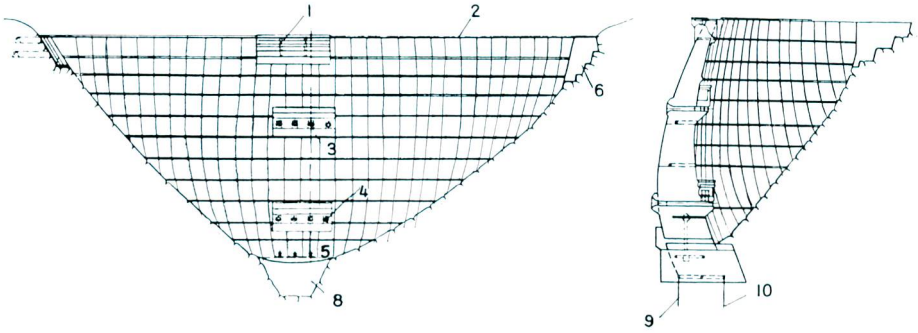



Bild 5

UNTERWASSERANSICHT UND SCHNITT DER STAUMAUER INGURI

1 Kronenüberfall
2 Mauerkrone
3 Zwischenablässe
4 Definitive Grundablässe
5 Provisorische Durchlässe
6 Linkes Widerlager
7 Rechtes Widerlager
8 Betonpfropfen
9 Injektionsschirm
10 Drainagen



stung[1]. Für ihre Errichtung werden insgesamt 4 Mio m³ hochwertigen Betons benötigt. Unter dem Mauerfundament werden Konsolidationsinjektionen auf eine Tiefe von 10 m, sowie ein zweireihiger Injektionsschirm auf eine Tiefe von 100 m vorgenommen.

Auch der Druckstollen des Kraftwerkes Inguri ist eine einzigartige Anlage (Durchmesser 9,5 m, Länge 15,5 km), wird er doch unter einem Druck von 15 bis 17 atü stehen und 450 m³/s schlucken. In der unterirdischen Zentrale werden fünf Einheiten installiert von je 265 MW Leistung, und der Druck im Kraftwerk erreicht 450 m Wassersäule. Durch einen Unterwasserstollen von 2,2 km Länge wird das Wasser in das Flussbett des Eris-zkali geleitet, wo mittels eines Erddamms der Wasserstand des Flusses um 60 m gehoben wird. An diesem Erddamm wird das Laufkraftwerk Nr. 1 gebaut. Ein offener Kanal von 24,5 km Länge wird das Wasser sodann ins Meer ableiten. An diesem Kanal befinden sich noch drei Laufkraftwerke, die zusammen eine Fallhöhe von 40 m nutzen. Von der gesamten Fallhöhe von 510 m entfallen auf die Bogenstaumauer 225 m und auf den Erddamm 60 m. So erhalten wir mittels Stauungen 285 m Fallhöhe und mittels Triebwasserleitungen die restlichen 225 m. Deshalb muss man das Kraftwerk Inguri zum Typ der gemischten Stau-Umleit-Kraftwerke zählen.

Geologisch besteht das Gebiet des Kraftwerkes Inguri aus Gesteinen verschiedener Zusammensetzungen und Alter, vom Jura bis zu rezenten Ablagerungen. Die Kreideformationen bestehen hauptsächlich aus Karbonatgesteinen (Kalk und Mergel), das Tertiär aus lehmig-sandigen Gesteinen. In tektonischer Beziehung ist das Gebiet ausserordentlich vielfältig. Man findet hier eine Reihe Faltungen und Verwerfungen regionalen Charakters. Alle Anlagen der Hauptstufe befinden sich in den Entstehungsgebieten des Barrême-Kalkes, die mit 60 bis 70° in Flussrichtung fallen. Im Bereiche des Flussbettes ist das ursprüngliche Gestein mit Rollstein-Kieselablagerungen von 30—40 m Mächtig-

[1] Seit der Fertigstellung im Jahre 1957 figuriert immer noch die 237 m hohe schweizerische Bogentalsperre Mauvoisin an der Spitze der in Betrieb stehenden Bogenstaumauern, und es sei hier auch an die 262 m hohe, kühne Bogenstaumauer Vajont in Italien erinnert; die höchste Talsperre der Welt ist immer noch die 1951—1962 errichtete 285 m hohe schweizerische Gewichtstalsperre Grande Dixence (Red.).

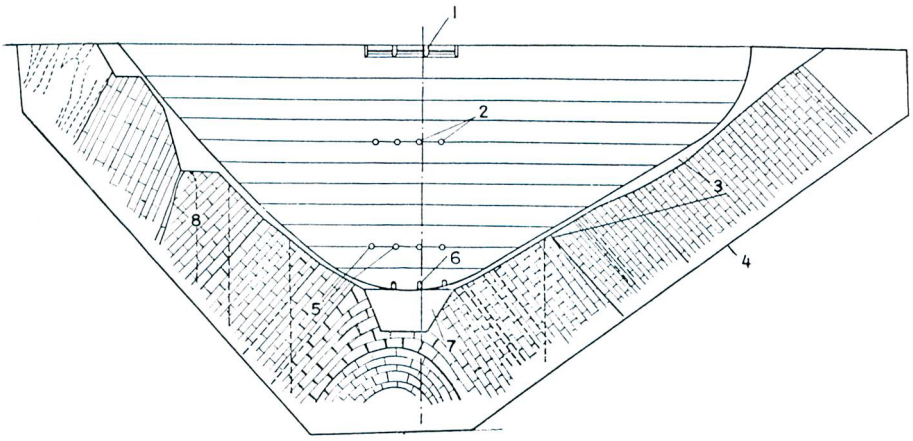



Bild 6
ABWICKLUNG DER LUFTSEITE DER BOGENSTAUMAUER INGURI

1 Kronenüberfall
2 Zwischenablässe
3 Auflagersattel mit Umfangsfuge
4 Untere Begrenzung des Injektionsschirmes
5 Definitive Grundablässe
6 Provisorische Durchlässe
7 Fundamentpfropfen
8 Ausbetonierte Verwerfung

keit bedeckt. An den Talflanken finden wir grössere Ablösungen, kleine zerstörte Zonen und einzelne Risse. Die Verkarstung des Kalkes ist gering und oberflächlich. Der Druckstollen verläuft hauptsächlich in einem Kalk der Oberkreide von hoher Festigkeit (1000 kg/cm²) und Verformungsmodul (100—300 000 kg/cm²). Das unterirdische Maschinenhaus befindet sich im teilweise wasserführenden Oberkreidekalk. An der Sperrstelle des Laufkraftwerkes Nr. 1 liegen obertertiäre Ablagerungen vor in Form einer Wechsellagerung von Konglomerat, Sandstein und Ton. Das praktisch wasserdichte Gestein unter dem Bett des Eris-zkali ist von einer bis 4 m dicken Geröllschicht überdeckt. Die Zuschlagstoffe für den Beton werden aus den Geröllablagerungen im Flussbett des Inguri gewonnen und teilweise auch durch Brechen des Tunnelausbruchs.

Die obenerwähnten natürlichen Gegebenheiten für das Kraftwerk Inguri erlauben es, sehr grosse und bedeutende Bauwerke zu errichten, von denen die hauptsächlichsten die Bogenstaumauer, der Druckstollen, die unterirdische Zentrale der Hauptstufe, der Erddamm (70 m hoch) und der offene Ableitungskanal (Schluckvermögen 450 m³/s) sind. Die Gesamtleistung des Kraftwerkes Inguri einschliesslich der Laufkraftwerke beträgt 1640 MW und die durchschnittliche Jahresproduktion 5,45 TWh.

Verbleiben wir kurz bei der Beschreibung der Bogenstaumauer Inguri, die in der Djwari-Schlucht errichtet wird. Ihr Bau erfolgt unter komplizierten ingenieur-geologischen Voraussetzungen im Bereiche von Karbonatgesteinen des Barrême und Apt (Kreide) mit einem steilen, monoklinen Fallen von 50 bis 60° flussabwärts. Der Kalk ist an den Hängen mit Gehängeschutt bedeckt, während das Flussbett mit einer 38 bis 40 m dicken Schicht von Roll- und Kieselsteinen gefüllt ist. Von der gesamten Bauhöhe der Staumauer von 271,5 m entfallen 231,5 m auf das Gewölbe und 40 m auf den Fundamentpfropfen. Es betragen ferner: die Sehnenlänge auf Kronenhöhe 566 m, die maximale Mauerstärke am Fuss des Hauptschnittes 52 m und am Auflager 60 m, die Kronenstärke entsprechend 10 und 12 m, das Verhältnis von Sehne zu Höhe des Gewölbes 2,45 und das von maximaler Mauerstärke zu Gesamthöhe 0,225. Die horizontalen Schnitte der Bogenstaumauer bestehen aus drei Kreisbögen. Die Wasser- und Luftseiten des mittleren Teiles dieser Bögen haben einen gemeinsamen Mittelpunkt, während dies für die beiden seitlichen Bogenteile nicht der Fall ist. Die Radien der letzteren sind auch grösser als die des mittleren Teils, was die Krümmung der Bogen in der Mitte verstärkt und im Auflagerbereich vermindert.

Ein Ueberfall mit drei Oeffnungen von je 25 m und Schützen befindet sich an der Krone. Sein Ableitvermögen beträgt 1000 m³/s. Zusammen mit den 4 Grundablässen von je 4 m Durchmesser gewährleistet er einen Abfluss von 2500 m³/s im Katastrophenfall von 0,01 % Wahrscheinlichkeit. Die Hochwasserableitung von 5 % Wahrscheinlichkeit, entsprechend 990 m³/s, bei Inbetriebnahme der ersten Etappe der Mauer erfolgt nur durch die vier Grundablässe. Zwecks Angleichung und Erhöhung der Festigkeit und des Verformungsmoduls des Gesteins werden Konsolidationsinjektionen auf eine Tiefe von durchschnittlich 10 m vorgenommen. Entlang dem wasserseitigen Fundamentfuss wird eine Dichtungsschürze auf eine Tiefe bis 100 m erstellt. Zur Entlastung der Talhänge und zur Absenkung der Sickerströmung sind Drainagestollen mit dem Querschnitt von 2 x 3 m vorgesehen, die durch vertikale Bohrlöcher miteinander verbunden werden.

## 3. Einige der speziellen wissenschaftlichen Untersuchungen für das Kraftwerk Inguri

Bei der Ausführung eines solch eigenartigen und komplizierten Bauwerkes wie das Kraftwerk Inguri, kommt den wissenschaftlichen Forschungen (theoretische, laboratoriumsmässige, naturwissenschaftliche usw.) entscheidende Bedeutung zu, da sehr viele wissenschaftliche Probleme auftauchen bei der Lösung der sich während Projektierung und Bau stellenden Aufgaben. An den Untersuchungen für das Kraftwerk Inguri waren mehr als 20 wissenschaftliche Forschungs- und Projektierungsinstitute beschäftigt, welche einen breiten Themenkreis unter Einschaltung einer grossen Zahl von Wissenschaftlern bearbeiteten. Federführende Organisation, welche den Hauptumfang der wissenschaftlichen Untersuchungen bewältigte und die Koordination der Arbeiten verschiedener Institute der Sowjetunion inne hatte, war das Tbilisser wissenschaftliche Forschungsinstitut für Hydroenergie und Wasserbau, ein Bestandteil des Ministeriums für Energie und Elektrifikation der UdSSR. Im Laufe der letzten Jahre hat das Tbilisser Institut über 50 Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse als Grundlage für die Projektierung und den Bau des Kraftwerkes Inguri dienten. Dabei wurde eine Reihe von Untersuchungen, die sich als bedeutende Neuheiten auszeichneten, als Erfindungen registriert. Verbleiben wir kurz bei den wesentlichsten dieser wissenschaftlichen Untersuchungen:

### 3.1. STATISCHE BERECHNUNGEN FÜR DIE BOGENSTAUMAUER INGURI

Im Laufe der Projektierung der Mauer wurden verschiedene Varianten ausgearbeitet, bezüglich ihrer Gestaltung, Aus-

masse und konstruktiven Besonderheiten. Für alle Varianten wurden statische Berechnungen nach verschiedenen Methoden durchgeführt. Ein grosser Teil der Berechnungen erfolgte an Hand zweier Näherungsverfahren, welche vom Tbilisser Forschungsinstitut entwickelt worden sind.

Das erste derselben heisst Schichtvariationsmethode, da sie auf der Zerlegung der Mauer in Schichten beruht und zur Lösung eine Variationsmethode verwendet. Die physikalischen Grundlagen und die Hauptmerkmale des Verfahrens sind dieselben wie bei der «Trial Load»-Methode, aber die mathematische Form ist originell und wirkungsvoller. Dabei wird die Mauer aus zwei miteinander verbundenen Schichten bestehend angenommen. Eine luftseitige Schicht besteht aus unendlich vielen, nicht unmittelbar miteinander verbundenen Bögen. Diese Schicht dient als elastische Bettung für eine zweite wasserseitige Schicht, welche aus unendlich vielen, nicht unmittelbar miteinander verbundenen Konsolen besteht. Die äusseren Kräfte greifen nur an der wasserseitigen Schicht an, während die Temperaturänderungen auf beide Schichten wirken. Die Verschiebungen einiger in bestimmten Abständen ausgewählter Konsolen entsprechen den unbekannten Funktionen der Aufgabe. Die Ausscheidung einer endlichen Zahl von Konsolen und das Nichtausscheiden analoger Bögen gibt dem Berechnungsverfahren einen kontinuierlich-diskreten Charakter. Auf Grund einer besonderen Art der Approximation der Kräfteresultierenden zwischen den zwei Schichten sowie der Bedingungen gleicher Verformung der berechneten Konsolen und ihrer aus den Bögen bestehenden elastischen Bettung erhält man ein System eindimensionaler Funktionsgleichungen, welche die Verformung der Mauer beschreiben (in der meist gebräuchlichen Variante gewöhnliche Differentialgleichungen). Zu ihrer Lösung benutzt man die auf besondere Weise angepasste Methode von Bubnow/Galerkin oder die äquivalente Methode von Ritz. Als Ergebnis erhält man ein System algebraischer Lineargleichungen niedriger Ordnung mit genügend stabilen Lösungen. Die Kontrolle der vollständigen Lösung auf eine von der Grundmethode unabhängige Art erhöht die Zuverlässigkeit der Berechnungen beträchtlich.

Die zweite Methode besteht darin, dass die Bogenstaumauer als dünne Schale betrachtet wird. Ein unendlich kleines Element dieser Schale von der Form eines krummlinigen Vierecks wird durch zwei miteinander verbundene fiktive Elemente ersetzt. Jedes von ihnen entspricht in der Form dem unendlich kleinen Ausgangselement, besitzt aber besondere mechanische Eigenschaften, die bis zu einem gewissen Grade an die Orthotropie erinnern. Einige der inneren Kräfte der Schale, welche in der Fläche des Ausgangselementes wirken, werden auf das erste fiktive Element übertragen. Die restlichen Kräfte greifen in der Fläche des zweiten fiktiven Elementes an. Das beschriebene Berechnungsschema führt auf ein System von Gleichgewichts-Differentialgleichungen mit Differentialquotienten, welche die Schnittkräfte enthalten und entspricht im Aufbau demjenigen, das in der Theorie der dünnen Schalen gültig ist. Zur Vereinfachung der Lösung wird die Aufgabe in zwei Systeme von Differentialgleichungen zerlegt, welchen gewisse Kräfte zugeordnet werden und von denen jedes das Gleichgewicht eines der beiden genannten fiktiven Elemente beschreibt. Die auf solche Art aufgeteilten Gleichungen enthalten zugleich die inneren Kräfte der Schale und die Kräfte aus der äusseren Belastung, also die Kräfte des Zusammenwirkens zweier fiktiver Systeme. Die Gleichungen dieser Kräfte, sowie diejenigen der inneren Drill- und Schubkräfte werden in doppelte Reihen zerlegt. Es werden Elastizitäts- und Verträglichkeitsbedingungen der beiden fiktiven Systeme für eine ausreichende Anzahl von Punkten der Mittelfläche der Schale eingeführt. Die Aufgabe wird auf die Integration gewöhnlicher Differentialgleichungen und letztlich auf ein System algebraischer Lineargleichungen reduziert. Die Grundannahmen sind bei dieser Methode analog denjenigen des «Trial Load»-Verfahrens.

Beide beschriebenen Methoden wurden für Elektronenrechenmaschinen mittlerer Grösse programmiert. Diese Programme sind für die Berechnung von Bogenstaumauern unter voller hydrostatischer Belastung, sowie unter dem Einfluss des Eigengewichtes, der Temperatur und der seismischen Einwirkungen bestimmt. Die mit Hilfe der genannten Programme erhaltenen Zahlenwerte über Spannungen und Verschiebungen ermöglichten einen Qualitätsvergleich der verschiedenen Varianten für die Bogenstaumauer Inguri. Diese Berechnungen, zusammen mit anderen Untersuchungen über den Spannungs- und Verformungszustand der Staumauer Inguri, einschliesslich Modelluntersuchungen, hatten eine grosse Bedeutung für die Ausarbeitung des Projektes der im Bau befindlichen Staumauer und für die Entwicklung ihrer optimalen Lösung.

## 3.2. HYDRAULISCHE UNTERSUCHUNGEN FÜR DIE ANLAGEN DES KRAFTWERKES INGURI

Im Tbilisser Forschungsinstitut wurden im Laufe der letzten Jahre hydraulische Modellversuche für alle wesentlichen Teile des Kraftwerkes Inguri unternommen, parallel zur Projektierung und Ausführung desselben.

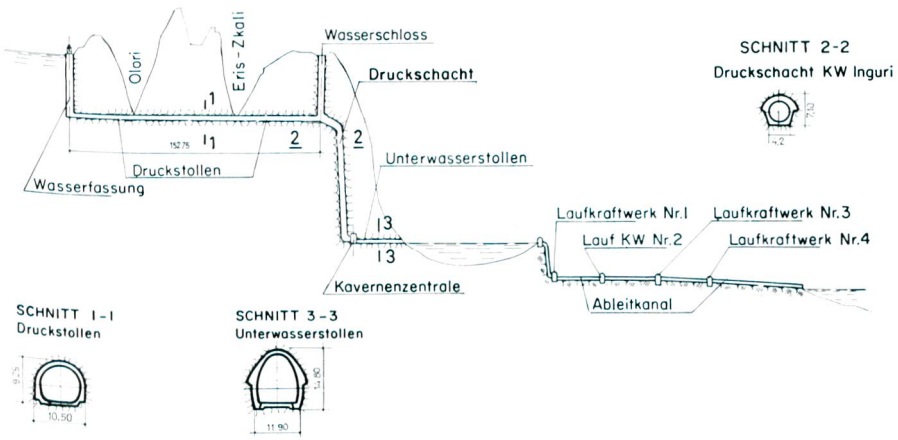



Bild 7
Schematischer Längsschnitt durch die Anlagen des Kraftwerks Inguri.

Bild 8
Modellversuch im Massstab 1:60 des Umleitstollens um die Sperrstelle Inguri.

Der erste, schon im Betrieb stehende Umleitstollen (Querschnittfläche über 100 m², Länge 520 m), welcher den Fluss durch die linke Flanke der Inguri-Schlucht um die Staumauerbaustelle leitet, wurde in den hydraulischen Laboratorien des Instituts in seinen ersten Varianten an Modellen in verschiedenen Massstäben untersucht und dann, schon im Bauabschluss-Stadium, an einem neuen Modell im Massstab 1 : 60 unter Berücksichtigung der im Verlaufe seines Vortriebs vorgenommenen Aenderungen. Dabei wurden die Zulässigkeit dieser Aenderungen überprüft und Massnahmen zur Verbesserung der Wirkungsweise des Stollens vorgeschlagen. Alle Vorschläge des Laboratoriums wurden von den Projektierungs- und Bauorganisationen berücksichtigt und akzeptiert und seit 1965 funktioniert der Stollen gut.

Einen grossen Umfang an Laborarbeit benötigten die hydraulischen Untersuchungen an den sehr bedeutenden Hochwasserentlastungsanlagen der Staumauer. Für diese wurden verschiedene Varianten untersucht:

a) Durchlassöffnungen im untersten Teil der Mauer in Form von drei Oeffnungen rechteckigen Querschnitts für die Ableitung von 400 m³/s bei Normalwasserständen, während der Zeit der Schliessung des Umleitstollens nach Beendigung der ersten Etappe der Mauer. Nach dem Verschluss des Stollens durch einen Betonpfropfen, sollten die Oeffnungen zubetoniert werden und die Füllung des Stausees beginnen.

b) Fünf Zwischenablassrohre durch den Mauerkörper der ersten Bauetappe auf 180 m Höhe über dem Fundament für die Ableitung von 950 m³/s während der Fertigstellung der Staumauer auf ihre volle Höhe. Der freie Fall des Wassers aus den Rohren in das Flussbett beträgt 140 m.

c) Betriebsüberfall an der Mauerkrone in der Form von sechs Oeffnungen von je 25 m Länge mit automatischen Verschlüssen, einem Ableitvermögen von 2500 m³/s und einer Fallhöhe von zirka 220 m.

Im hydrotechnischen Laboratorium wurden verschiedene Varianten der Grundablassöffnungen an Modellen in den Massstäben 1:100 und 1:50 untersucht. Die Zwischenablassöffnungen der ersten Bauetappe wurden in drei verschiedenen Varianten an Modellen in den Massstäben 1:100, 1:50 und 1:40 geprüft. Der Betriebsüberfall an der Mauerkrone wurde als der wichtigste am gründlichsten untersucht. Erstens, um den Typ des Ueberfalls zu wählen, an einem Gesamtmodell im Massstab 1:125, wobei parallel zum freien Ueberfall mit fünf oder sieben Oeffnungen auch eine Hochwasserentlastung in Form von drei Oeffnungen auf einer Tiefe von 25 m unter dem normalen Stauziel studiert wurde. Ferner wurden zur Wahl des Typs der Ueberlaufkrone und zur Bestimmung ihrer Form Untersuchungen in drei Varianten an Teilmodellen in den Massstäben 1:50 und 1:40 durchgeführt. Die Variante des Kronenüberfalls mit sechs Oeffnungen von je 25 m wurde an einem speziell gebauten, grossen räumlichen Modell im Massstab 1:40 gründlich untersucht. Als Endergebnis wurden das Ableitvermögen ermittelt, die Lage des Ueberfalls im Grundriss festgelegt, konstruktive Massnahmen zur Verengung des Ueberfallstrahls zur Vermeidung der Unterspülung der Talflanken empfohlen, die Frage der Auskolkung der Alluvionen im Flussbett erforscht, usw.

Im Gefolge der technischen Ueberprüfung des Projektes wurden die Zusammensetzung, Bestimmung und Dimensionen der Entlastungsorgane der Bogenstaumauer Inguri wie folgt geändert:

a) Zwecks Verminderung der Vibrationswirkungen auf die Mauer und zur Verengung des frei fallenden Wasserstrahls wurde empfohlen, den Kronenüberfall neu zu projektieren unter Verminderung der Anzahl der Oeffnungen von sechs auf drei, der gesamten Ueberfallänge von 150 auf 75 m und des Ableitvermögens von 2500 auf 1000 m³/s.

b) Es wurde vorgeschlagen, die Zwischenablässe für die erste Bauetappe in der Form von vier runden Oeffnungen von je 4 m Durchmesser mit Endverschlüssen als bleibend anzunehmen. Ihre Bestimmung ist jetzt, eine möglichst rasche Senkung des Wasserstandes im Stausee und den zuverlässigen Betrieb der Mauer unter speziellen Bedingungen sicherzustellen. Bei gefülltem Stausee und einem Druck über den Oeffnungen von 80 m, beträgt ihr Ableitvermögen 1500 m³/s.

c) Ausserdem wurden die von Tbili-Hydroprojekt vorgeschlagenen Grundablässe auf einer Höhe von 80 m über der Mauersohle (oder 35 bis 40 m über dem Flussbett) in Form ebensolcher vier Rohre von je 4 m Durchmesser mit Verschlüssen sanktioniert. Sie sind für die Umleitung wäh-

Bild 9 Modellversuch im Massstab 1:40 des Kronenüberfalls mit sechs Oeffnungen von je 25 m für die Ableitung von 1800 m³/s.

Bild 10 Wie Bild 9 nach Einbau von Strahlablenkern in den beiden äusseren Oeffnungen.

rend der ersten Bauetappe, die Regulierung des Wasserstandes im See während seiner Füllung und dessen Entleerung im Notfall vorgesehen.

Die hydraulischen Untersuchungen für diese Entlastungsorgane wurden 1970 abgeschlossen, ebenso wie die genauen Kavitationsuntersuchungen und andere Spezialuntersuchungen für die Schützen.

### 3.3. UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE SEISMISCHE STABILITÄT DER BOGENSTAUMAUER INGURI

Der Nachweis der seismischen Stabilität der Bogenstaumauer Inguri war eines der Hauptprobleme bei der Bearbeitung ihres Projektes, da die Sperrstelle durch eine erhöhte seismische Aktivität gekennzeichnet ist (bis Intensität VIII). Bekanntlich sind analytische Methoden zur Ermittlung des seismischen Spannungs- und Verformungszustandes von Staumauern noch im Entwicklungsstadium. Die bestehenden, äusserst näherungsweisen Methoden zur Berechnung von Staumauern auf seismische Einwirkungen können keine Antwort über ihr dynamisches Verhalten geben, da sie alle auf der statischen Theorie der seismischen Stabilität beruhen. Dieser Zustand konnte angesichts der grossen Dimensionen der Staumauer Inguri nicht befriedigen.

In Anbetracht des oben Dargelegten, erhielt unser Institut den Auftrag, eine einzigartige Untersuchung zur Frage der seimischen Stabilität an grossen Modellen der Staumauer durchzuführen, was die Behandlung einer Reihe von theoretischen, methodologischen und technischen Problemen erforderte. Auf der Grundlage der dynamisch-spektralen Theorie der seismischen Stabilität, wurde eine Methodik ausgearbeitet zur Ermittlung der seismischen Trägheitskräfte, welche auf die Bogenstaumauer wirken. In unmittelbarem Zusammenhang damit und unter Berücksichtigung der Aehnlichkeitstheorie, wurde eine neue Methodik zu Untersuchungen von Staumauermodellen entwickelt, welche in der Erzeugung von Schwingungen, die in Spektrum und Frequenz den Eigenschwingungen des Modells ähnlich sind, und der darauf folgenden Summierung der entsprechenden Deformationen und Spannungen in einer bestimmten Reihenfolge besteht. Es ist eine Besonderheit dieser Methode, dass sie ausgehend von der dynamisch-spektralen Theorie der seismischen Stabilität mit den bestehenden Normen im Einklang steht. Als Ergebnis spezieller Untersuchungen erhielt man einen neuen, sehr brauchbaren Modellbaustoff mit einem niedrigen Elastizitätsmodul von nur 5000 bis 10 000 kg/cm² und einem Raumgewicht von 1,2 bis 4,5 t/m³. Die Verwendung dieses Baustoffs erleichterte beträchtlich die Untersuchungen an den Modellen. Dazu wurde ein leistungsstarker Rütteltisch gebaut mit einer Tragfähigkeit von 40 t und mit mechanischen Vibratoren, welche Rüttelkräfte von 25 t entwickeln können. Speziell studiert wurde die Konstruktion und Auswahl der Standardapparate für die Messungen während der Modellversuche.

Das Hauptziel der Untersuchungen für die Bogenstaumauer Inguri war die Ermittlung der Spannungen und Deformationen der Mauer unter seismischen Einwirkungen der Intensität VIII bis IX längs und quer zur Schlucht sowie die Erforschung der dynamischen Charakteristiken der Stau-

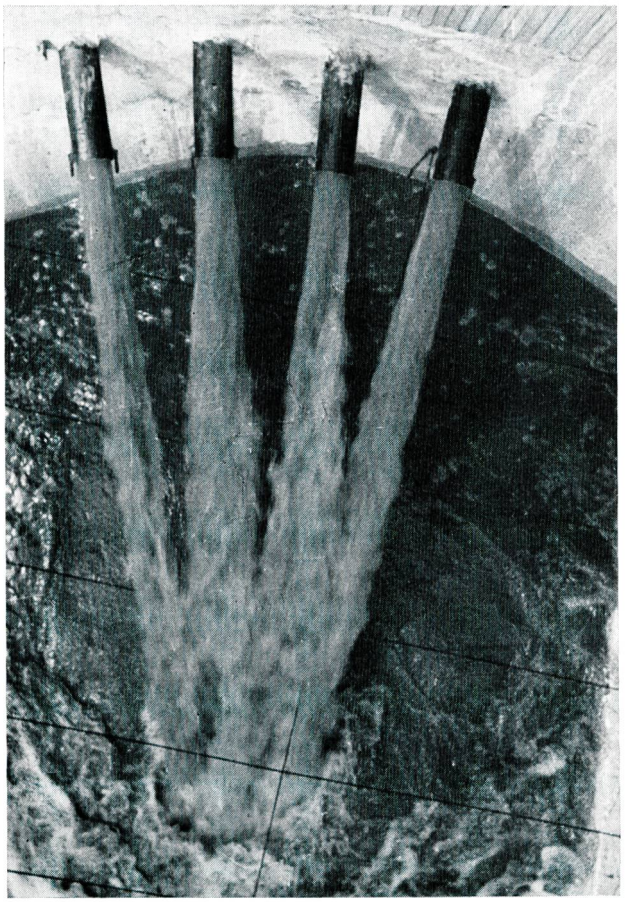


Bild 11 Modellversuch im Massstab 1 : 40 der vier Grundablassrohre bei Ableitung von 1850 m³/s.

mauer (Spektrum und Frequenzen der Eigenschwingungen). Geprüft wurden Modelle im Massstab 1:200, mit Nachbildung der elastischen Charakteristiken des Untergrundes, von zwei Projektvarianten: eine mit Horizontalschnitten aus einem Kreisbogen, die andere mit solchen aus drei Kreisbogenstücken. Die Modellversuche erfolgten ohne Füllung des Staubeckens mit Wasser. Während der Untersuchungen wurden keine Störungen in den Modellkörpern festgestellt, mit Ausnahme einer teilweisen Ablösung des luftseitigen Mauerfusses vom Untergrund im oberen Teil. Diese Ablösungen erstreckten sich bei beiden Projektvarianten über zirka 10 % der Mauerhöhe und traten in den Anfangszyklen der Untersuchungen auf ohne sich später weiter zu entwickeln. Die durchgeführten Untersuchungen erlaubten eine Reihe von Schlussfolgerungen:

a) Bei beiden Projektvarianten übersteigen die Spannungen bei seismischer Quereinwirkung, das heisst, einem Seitenbeben, (für Einkreisbogen 16,35 kg/cm² und für Dreikreisbogen 23,90 kg/cm² je zirka im Bogenviertel auf 64 % der Mauerhöhe) wesentlich die Spannungen bei seismischer Längseinwirkung (für Einkreisbogen 9,93 kg/cm² und für Dreikreisbogen 11,70 kg/cm²).

b) Bei seismischen Einwirkungen der Intensität VIII und mehr sind bei leerem Staubecken lokale Ablösungen zwischen der Mauer und den Talflanken im oberen Teil der Luftseite zu erwarten.

c) Der Vergleich der Spannungen in analogen Punkten beider Projektvarianten der Mauer hat gezeigt, dass diese von gleicher Grössenordnung sind, obwohl beim Seitenbeben die Spannungen mit Einkreisbogen etwas kleiner sind. Dies scheint aus den Unterschieden der Formen und Querschnittsmasse der verglichenen Mauervarianten zu resultieren.

d) Ungeachtet dieser geometrischen Unterschiede, haben die Modelluntersuchungen gezeigt, dass die Frequenzen (Perioden) der Eigenschwingungen beider Mauervarianten sich wenig unterscheiden ($\omega_1$ = 1,16 und $\omega_2$ = 1,46 Hertz mit Dreikreisbogen sowie $\omega_1$ = 1,26 und $\omega_2$ = 1,44 Hertz im Einkreisbogen).

e) Unter Berücksichtigung des Umstandes, dass bei einzelnen Frequenzen unter seismischer Einwirkung quer zum Tal beträchtliche Spannungen entstehen, und unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Kontrollfalles (Intensität IX) wurde eine leichte konstruktive Armierung vorgesehen, um

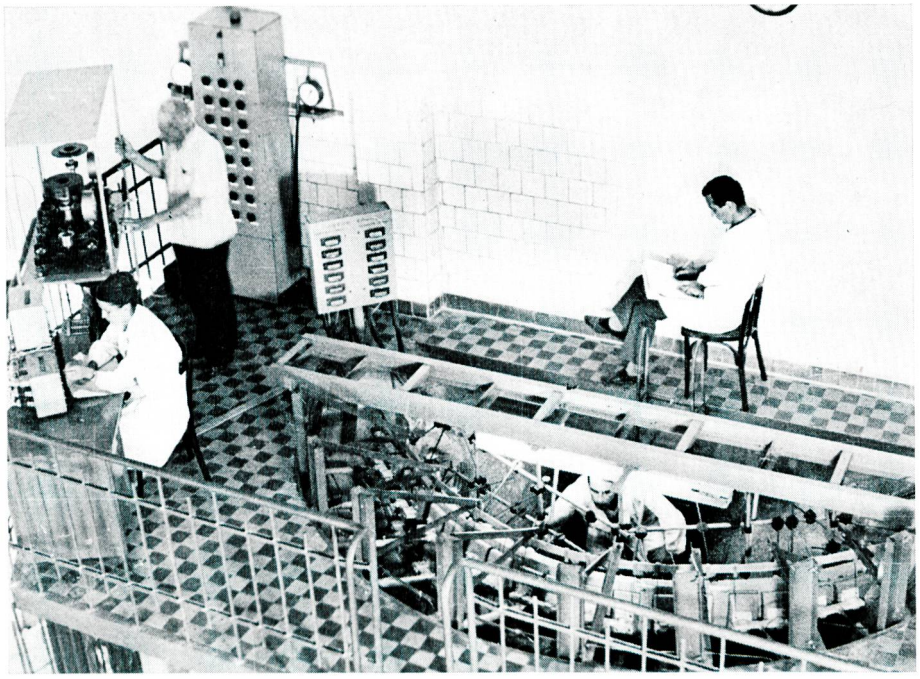


Bild 12
Gesamtansicht des Versuchsstandes mit dem statischen Modell im Massstab 1 : 200.

dem Baustoff der Mauer eine gewisse Plastizität zu verleihen. Zwecks Erhöhung des Schubwiderstandes des Betons und zur Verhinderung von Rissbildungen an Ecken und am Kontakt mit dem Felsuntergrund, sowie zur Begrenzung der möglichen Ablösungen bei starken seismischen Erschütterungen, musste, ausser der leichten Armierung als eine der wirkungsvollsten Massnahmen, zur lokalen Verstärkung der Bogenkämpfer mit allmählicher Querschnittsänderung gegen diese hin geschritten werden.

Ein anderer grosser Forschungsbereich über das Verhalten der Bogenmauer betrifft die Organisation und Durchführung seismologischer Beobachtungen am Bauwerk selbst. Mittels Sprengungen auf der Baustelle und der Auswertung von Mikroseismen und Erdbeben sind Untersuchungen in folgenden drei Etappen vorgesehen: vor der Errichtung der Mauer (Vibration nur des Staumaueruntergrundes), während des Baues und nach der Füllung des Stausees. Die ersten zwei Etappen der Untersuchung werden mit provisorischen, mobilen, die dritte mit stationären Beobachtungssystemen durchgeführt. Ausserdem ist vorgesehen, mittels des stationären Beobachtungsnetzes die Vibrationen der Mauer während der Hochwasserentlastung über ihre Krone zu untersuchen.

Naturbeobachtungen — seismische wie dynamische — sind dazu prädestiniert, Angaben über das tatsächliche Verhalten der Mauer unter dynamischen Einwirkungen zu liefern für die weitere Vervollkommnung der Berechnungsmethoden und der Projektierung von Bogenstaumauern unter Berücksichtigung der seismischen Faktoren und des dynamischen Effektes des Wasserüberfalls bei Hochwasser. Andererseits können auf Grund der Beobachtungen des Verhaltens der Mauer bei relativ schwachen Erdbeben der Spannungs- und Deformationszustand bewertet werden, der den rechnerischen Erdbebenwirkungen entspricht, und entsprechende Sicherheitsmassnahmen getroffen werden, um katastrophale Folgen auszuschliessen. Das Tbilisser Forschungsinstitut hat die Frage der Stationierung der Beobachter und der Aufstellung der Kontroll- und Messapparate im Mauerkörper behandelt, wobei an seismologischen Beobachtungen die Registrierung und automatisierte Verarbeitung der Messwerte über Beschleunigungen, Verschiebungen und Deformationen, Spannungen in der Mauer sowie den hydrodynamischen Wasserdruck vorgesehen sind.

### 3.4. STATISCHE MODELLVERSUCHE FÜR DIE BOGENSTAUMAUER INGURI

Im Tbilisser Forschungsinstitut wurde eine vervollkommnete Versuchsmethode zur Untersuchung von Bogenstaumauern an Modellen entwickelt. Es wurden zwei Versuchsstände in Betrieb genommen: ein grosser für Modelle von bis 3 m Höhe und 6 m Sehnenlänge und ein mittlerer für halb so grosse Modelle. Jeder Versuchsstand besteht aus einem Eisenbetontrog von mehr als halbkreisförmigem Grundriss. Durch Profilstahldecken sind die Stände in zwei Etagen geteilt: in der oberen werden die Modelle der Mauer und ihres Felsuntergrundes untergebracht, sowie das System zur Aufbringung des hydraulischen Drucks; in der unteren Etage befindet sich die Zugeinrichtung für die Nachbildung des Eigengewichts.

Das System zur Erzeugung des hydrostatischen Drucks besteht aus mehreren Reihen von hydraulischen Pressen, von welchen jede den Druck über einen Waagebalken auf zwei Auflagestellen an der Wasserseite des Modells überträgt. Die Durchmesser der Pressen nehmen von oben nach unten zu und sind so angepasst, dass bei gleichem Druck im hydraulischen System die vorausbestimmte Gesetzmässigkeit der Drucksteigerung auch senkrecht nach unten gewährleistet bleibt. Die Pressen wurden mit sieben verschiedenen Durchmessern angefertigt: 25, 40, 50, 60, 70, 80 und 90 mm. Der Druck im hydraulischen System erreicht 300 atü und die gesamte Reaktion der Pressen im grossen Versuchstrog 1000 und im mittleren 200 t. Das System zur Nachbildung des Eigengewichtes besteht aus im Modell eingelassenen Ankern, von denen Zugstangen in die untere Etage führen. Eine gesonderte Spannvorrichtung, die auch durch hydraulische Pressen betätigt wird, besorgt die gleichmässige Spannung aller Zugstangen und das Gleichbleiben der Kräfte in ihnen. Beide Belastungssysteme werden von einem gemeinsamen Pult aus gesteuert. Die Belastungen können sowohl synchron (in gleichen Teilen der geplanten Endlast), als auch selbständig aufgebracht werden. Zur Erzeugung des Oeldruckes werden Kolben mit Gewichten verwendet, die eine hohe Präzision und Stabilität der Belastungsdosierung gewährleisten.

Zur Untersuchung von Vorprojekten einer Bogenstaumauer wurde aus Stahl ein Presstisch hergestellt von 1,5 x 2 m Grundriss und 1 m hohen Widerlagern, die mittels Bolzen an jeder beliebigen Stelle des Tisches und in verschiedenen Richtungen befestigt werden können und sowohl das Modell wie auch die Belastungseinrichtung stützen. Auf dem Tisch können Modelle der verschiedensten Konstruktionen und Anlagen in entsprechenden Massstäben geprüft werden. So dürfen Bogenstaumauermodelle eine Höhe bis 0,6 m und eine Sehnenlänge bis 1,2 m haben. Zur Belastung der Modelle werden kleinkalibrige hydraulische Pressen verwendet.

Als Baustoff für die Bogenstaumauermodelle wurde Bimssteinbeton gewählt, welcher besser als die gebräuchlichen Gips- und Sand-Mischungen die Festigkeits- und Deformationseigenschaften des Betons des Prototyps nach-

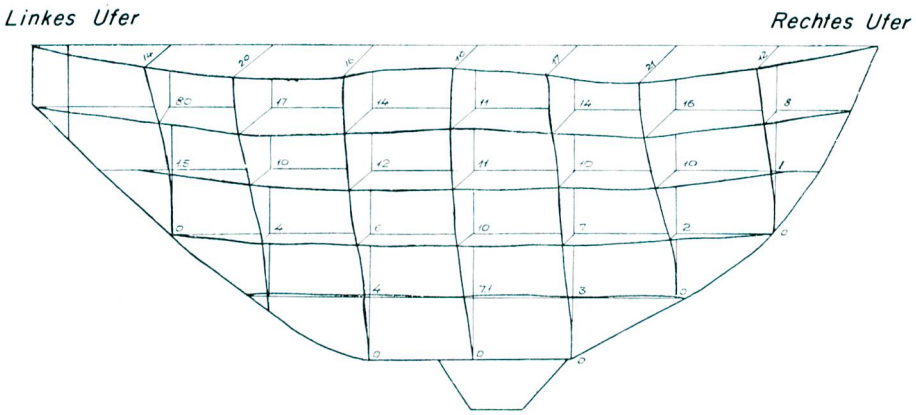



Bild 13
Radiale Durchbiegungen infolge Eigengewicht und Wasserdruck.

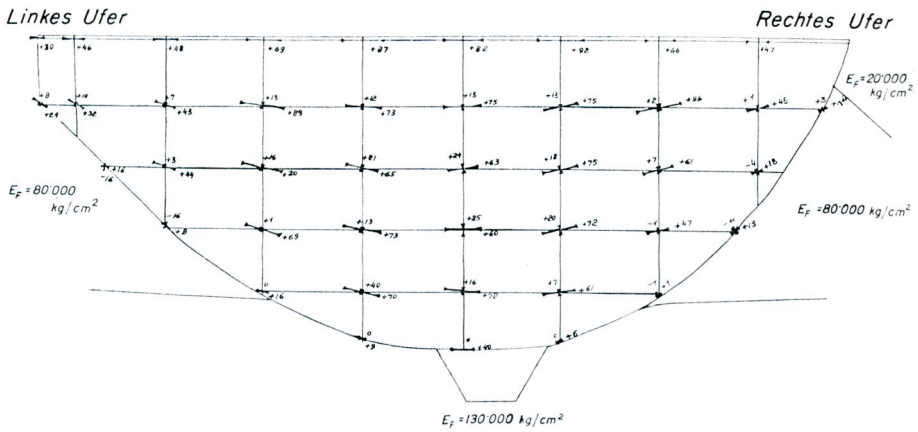



Bild 14
Wasserseitige Hauptspannungen infolge Eigengewicht und Wasserdruck.

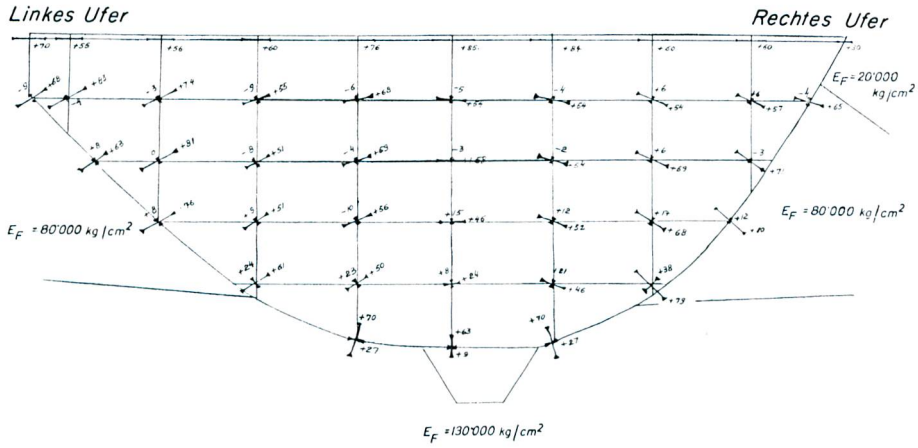



Bild 15
Luftseitige Hauptspannungen infolge Eigengewicht und Wasserdruck.

bildet, und zwar nicht nur im Stadium elastischer Beanspruchungen sondern auch über ihren Bereich hinaus bis zum Bruchstadium, und damit erlaubt, glaubwürdigere Grössen für den Sicherheitskoeffizienten des Bauwerks zu erhalten. Zur Gewährleistung einer hohen Homogenität wird der Bimsstein sorgfältig abgestuft. Zum Beispiel wird für Bogenstaumauermodelle Bimssteinsand mit 5 mm Maximalkorn verwendet (mit Ausscheidung der staubähnlichen Teilchen unter 0,15 mm), aufgeteilt in drei Fraktionen. Zu diesem Zweck wurde für das Labor eine mechanische Siebanlage erstellt mit einem Satz genormter Siebe und Antrieb durch einen unten angehängten elektrischen Vibrator. Die Siebanlage ist für eine kontinuierliche Beschickung und Materialentnahme eingerichtet und ihre Leistung erreicht 100 kg/h trockenen Bimssteinsand.

Bei der Staumauer Inguri wurde ein Modell im Massstab 1:200 geprüft für die Variante von 271,5 m Höhe, mit Dreikreisbogen und Fundamentpfropfen. Die Höhe des letzteren beträgt 40 m. Von der Mitte zu den Auflagern nehmen die Bogenstärken zu und betragen am Kontakt mit dem Pfropfen 52 m, in Kronenmitte 10 m und an den Kronenenden 12 m. Für den Mauerbeton wurde eine Druckfestigkeit von 350 kg/cm² (im Alter von 180 Tagen) und ein Elastizitätsmodul von 340 000 kg/cm² angenommen. Der Felsuntergrund besteht aus drei verschiedenen Zonen, gekennzeichnet durch mittlere Deformationsmoduli von 130 000, 80 000 und 20 000 kg/cm². Die Zusammensetzung des Bimsbetons für das Modell der Bogenstaumauer und der verschiedenen Zonen des Felsuntergrundes wurde entsprechend angepasst. Es wurden folgende Werte der Aehnlichkeitskoeffizienten ermittelt: geometrische Dimensionen 200, Elastizitätsmodul 5,24, Festigkeit 6,7, Deformationen 1,28, Verschiebungen 256 und Raumgewicht 30.

Zur Herstellung der Gipsschalung für das Modell wurde zuerst eine Gipsmatrize mit einer Karkasse aus Sperrholz hergestellt und sorgfältig ausgerichtet. Die drei Zonen des Felsuntergrundes und das Modell der Staumauer wurden nacheinander in den Versuchsstand eingebaut. Zwecks Vermeidung von Schwindrissen, wurde das Modell in einzelnen Blöcken von 80 cm Länge erstellt. Nach einem Monat, als die Oeffnung der Fugen von 0,8 bis 1,0 mm sich stabilisiert hatte, wurden diese durch Einspritzung von Epoxileim, verdünnt mit einem schaumbildenden Zusatz, geschlossen. Der hydrostatische Druck auf das Modell wurde durch sechs Reihen von hydraulischen Pressen, mit von oben nach unten zunehmenden Durchmessern, erzeugt. Zur Nachbildung des Eigengewichts wurden in den Schwerpunkten gleich grosser Volumenelemente Anker eingelegt, von denen Zugstangen in die untere Etage durchgelassen wurden. Mittels eines speziellen Systems, welches ebenfalls durch hydraulische Pressen betätigt wird, wurde eine gleichmässige Spannung aller Zugstangen gewährleistet. Beide Belastungssysteme wurden vom gemeinsamen Steuerpult aus betätigt und ermöglichten sowohl eine synchrone als auch eine unabhängige Laustaufbringung. Der projektmässige Wasserdruck und das Eigengewicht erforderten einen gleichmässigen Druck in allen Pressen von 76 atü. Die Ueberprüfung der Homogenität des Modellbaustoffs erfolgte mittels Ultraschall.

Zur Deformationsmessung wurden auf beiden Flächen des Modells elektrische Dehnungsgeber aufgeklebt sowie vier weitere senkrechte Geber an der Fuge zwischen Ge-

wölbe und Pfropfen zur Beobachtung ihres Verhaltens. Die Deformationsmessungen erfolgten mit Hilfe einer tensometrischen Brücke. Die Durchbiegungen wurden in 51 Punkten der Luftseite mittels eines Uhrenindikators mit Skalaeinteilungen von 0,01 und 0,001 mm gemessen. Das Bild 12 gibt eine Gesamtansicht des Versuchsstandes und des Modelles während der Versuche. Das Modell wurde in Stufen von 25 % der Endlast belastet. Für jede Stufe wurden je 5 Belastungs- und Entlastungszyklen durchgeführt.

Bild 13 gibt die Durchbiegungen in cm infolge Totalbelastung (Wasserdruck plus Eigengewicht). Der ausgeprägt sattelförmige Charakter der Biegelinien im oberen Teil ist die Folge der beträchtlich stärkeren Krümmung in Mauermitte als an den Auflagern. Die Bilder 14 und 15 geben die Hauptspannungen in kg/cm² an beiden Seiten der Staumauer infolge Totalbelastung, wobei das Pluszeichen eine Druckspannung und das Minuszeichen eine Zugspannung bezeichnen. Infolge Oeffnung der Fugen zwischen Gewölbe und Pfropfen auf der Wasserseite (was durch die über die Fuge geklebten senkrechten Geber festgestellt wurde), sind die Zugspannungen im untersten Gewölbeteil verschwunden. Die grössten Druckspannungen wurden in den Vierteln der oberen Bögen an der Wasserseite beobachtet und erreichten 96 kg/cm². Die grössten Spannungen, die auf den Felsen abgegeben werden, betragen 80 kg/cm². Der Pfropfen funktioniert im wesentlichen wie ein Keil und die Druckspannungen an ihm übersteigen nicht 15 bis 20 kg/cm². Die angeführten Untersuchungen ergaben:

a) Die Möglichkeit, die Mauerform weiter zu verbessern zwecks einer gleichmässigeren Verteilung der Spannungen.

b) Die Notwendigkeit der Errichtung eines verbreiterten Auflagersattels mit Fuge entlang dem ganzen Umfang der Staumauer zur Verminderung der auf den Fels übertragenden Spannungen und zu ihrer gleichmässigeren Verteilung.

c) die Möglichkeit, im Pfropfen Beton von 250 kg/cm², statt der projektierten, Festigkeit zu verwenden.

Adresse des Verfassers:
Prof. Lewan Grigoriewitsch Gwelessiani
Leninstrasse 70, Tbilissi-15/Georgien UdSSR

## Nachwort

Einem der neuesten Berichte eines westlichen Besuchers auf der Inguri-Baustelle (Engineering News Record vom 5. August 1971, Seiten 22/24) kann entnommen werden, dass die 1964 aufgenommenen Bauarbeiten noch nicht über den Fundamentaushub hinaus gediehen sind. Dies ist einerseits der grossen Aushubkubatur von 2,5 Mio m³ oder 63 % des Mauervolumens zuzuschreiben, andererseits den in der obern Hälfte der rechten Talflanke angetroffenen 20 bis 30 cm breiten und 50 bis 200 m langen, mit Lehm gefüllten Verwerfungen, welche umfangreiche Verstärkungsmassnahmen erforderlich machten. Diese bestehen hauptsächlich aus zahlreichen, betongefüllten Stollen von 4,5 m Durchmesser, welche die Auflagerkräfte der Mauer in tiefere, tragfähigere Felsschichten übertragen sollen und somit eine Art horizontale Pfahlfundation darstellen.

Trotz dieser Schwierigkeiten sollen aber keine Aenderungen am Mauerprojekt, wie es vorstehend von Prof. Gwelessiani beschrieben wird, vorgenommen worden sein. Gerechterweise muss dazu noch festgehalten werden, wie stark das Projekt offensichtlich durch die Werke des grossen italienischen Talsperrenbauers Dr. h. c. Carlo Semenza (1893—1961), namentlich durch dessen 262 m hohe Vajont-Sperre, inspiriert worden ist. Dies gilt bis ins Detail des Auflagersattels am Mauerumfang (vom Erfinder Semenza «pulvino» genannt) sowie für die Technik der Modellversuche, die seit mehr als 20 Jahren an der weltbekannten ISMES in Bergamo fast haargenau gleich gehandhabt wird.

Während der Bau der unterliegenden Kraftwerkanlagen schon weit fortgeschritten ist, ist die Fertigstellung der Staumauer Inguri nun auf 1976 vorgesehen. Hiezu wurden eine neuartige Durchlauf-Betonmischanlage und vier 25-t-Kabelkrane installiert, sowie ein Heer von 12 000 (sic!) Arbeitern bzw. Arbeiterinnen mobilisiert. N. Schnitter

Uebersetzung durch A. Böttcher und N. Schnitter, Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden

BILDERNACHWEIS:
Pläne und Photos der Bilder 2 bis 15 wurden vom Verfasser des Berichtes zur Verfügung gestellt.

# WASSERBAUGESCHICHTLICHE EXKURSION IN DIE PROVENCE

DK 626/627 (44)

Niklaus Schnitter

## 1. Nîmes

Die Provence im Deltagebiet der Rhone in Südost-Frankreich ist nicht nur ein von Geschichte und Kultur durchtränkter Boden, sondern auch reich an Zeugnissen alter Wasserbautechnik (Bild 1). Hier denkt jedermann wohl gleich an den auch als eines der künstlerisch ansprechendsten römischen Bauwerke weltberühmt gewordenen Pont du Gard nordöstlich von Nîmes (Bild 2). Doch wie viele der zahllosen Besucher sind sich bewusst, dass die imposante Brücke nur einen relativ kleinen Teil eines viel grösseren Werkes darstellt, des 49,8 km langen Aquäduktes von Nîmes? [2] Die Initiative zu dessen Erstellung wird Marcus Vipsanius Agrippa (63—12 v. Chr.) zugeschrieben, dem treuesten Helfer und Schwiegersohn des Kaisers Augustus, welcher während seiner zweiten Amtszeit als Statthalter von Gallien um 19 v. Chr. in dem sich der besonderen kaiserlichen Gunst erfreuenden Nemausus residierte.

Der Ausgangspunkt des Aquäduktes befand sich an der Quelle des Eure, unmittelbar südlich der Brücke über den Alzon zwischen Uzès und Pouzilhac (Bild 3). Der Eure und einige andere Quellen wurden in Kreisbecken von einigen Metern Durchmesser gefasst und in den Aquädukt eingeleitet. Dieser ist auf 93 % seiner Länge im Graben erstellt

[] Hinweis auf Literaturangaben am Schluss dieses Berichtes.