

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 78 (1986)
Heft: 10

Artikel: Hydraulische Modellversuche zur Staumauer Solis
Autor: Huber, Andreas
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940874>

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: 10.02.2026

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

Hydraulische Modellversuche zur Staumauer Solis

Andreas Huber

Zusammenfassung

Bei der Projektierung der Staumauer Solis stellten sich verschiedene hydraulische Probleme, die an einem Versuchsmodell gelöst wurden. Zum Versuchsprogramm gehörten die Bemessung des Bauumleitstollens, die Formgebung, der Kapazitätsnachweis und die Funktionsüberprüfung der als Schussrinne mit Sprungschanze konzipierten Hochwasserentlastung, die Ausbildung des Mauerüberfalls und die Verbesserung der Strömungsverhältnisse vor dem Fassungsturm.

Résumé: Essais hydrauliques sur modèle réduit du barrage de Solis

La conception du barrage de Solis a nécessité l'étude de différents problèmes hydrauliques qui ont été résolus à l'aide d'un modèle réduit. Les essais ont porté sur les points suivants: Le dimensionnement de la galerie de dérivation, le façonnage, le contrôle de la capacité et l'exploitation de l'évacuateur de crues en saut de ski, la forme de la crête déversante et l'amélioration du courant en face de la prise d'eau.

Summary: Hydraulic model tests on the Solis Dam

Planning and design of the Solis Dam required solving of several hydraulic problems by model tests. Topics of test program were the design of the diversion tunnel; shaping, capacity and operating checks of the spillway and ski jump; the shape development of the dam overflow crest and the improvement of flow conditions in front of the intake tower.

1. Einleitung

Die hydraulischen Fragestellungen zum Projekt der Staumauer Solis sind in einem Modell im Massstab 1:40 (Bild 2) an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) im Auftrag des IBA, Ingenieurbüro für bauliche Anlagen, Abteilung der Industriellen Betriebe der Stadt Zürich, untersucht worden. Eine Auswahl Versuche an den verschiedenen Anlageteilen und die hierzu angestellten Überlegungen sind nachfolgend beschrieben.

Bild 1. Situation der Staumauer Solis mit Nebenanlagen. 1 Schussrinne, 2 Stauplalte 8 m x 3,75 m, 3 zwei Grundablässe 2,4 m x 1,8 m, 4 Mauerüberfall, 5 Hilfsklappe 3 m x 1,25 m, 6 Fassungsturm mit Einlaufrechen, 7 Rohrbrücke, 8 Druckstollen zu den Zentralen Sils und Rothenbrunnen, 9 Bauumleitstollen, 10 Betriebsgebäude, 11 Bedienungsebene, 12 Zufahrtstraße, 13 Ausbruchdeponie, 14 provisorischer oberer Abschlussdamm, 15 provisorischer unterer Abschlussdamm.

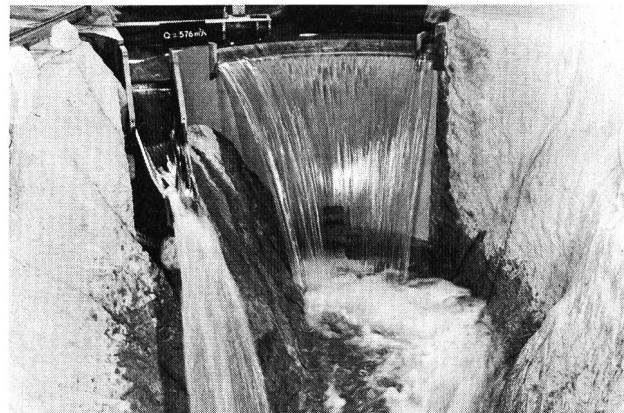
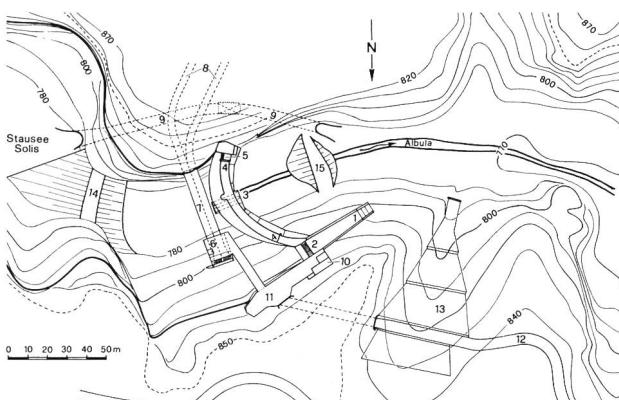


Bild 2. Ansicht des hydraulischen Versuchsmodells bei einem Katastrophenhochwasser von 576 m³/s, links die Schussrinne mit Wurfstrahl, in der Mitte der Mauerüberfall.

2. Der Bauumleitstollen

In der 3 1/2-jährigen Bauzeit wurde die Albula während fast drei Jahren durch einen 100 m langen, in der linken Schluchtwand liegenden Stollen um die Baustelle geführt (Bild 1). Zwei provisorische Abschlussdämme, je einer oberhalb (Dammkrone 784 m ü. M.) und unterhalb (Dammkrone 778 m ü. M.) der zu errichtenden Staumauer hatten das Wasser vom Arbeitsbereich fernzuhalten. Der Grenzabfluss der Albula, bis zu welchem die Krone nicht überflutet werden sollte, wurde auf 175 m³/s festgelegt. Heute verschliesst ein Betonpropfen den Umleitstollen.

Im Modellversuch war die Durchflusskapazität des Umleitstollens unter Einhaltung eines noch zulässigen Rückstaus nachzuweisen. Das Projekt sah ein hufeisenförmiges Stollenprofil mit gleichbleibendem Querschnitt von 25 m² und ein Sohlengefälle von 1,6 % vor.

Erste Versuche ergaben beim vorgegebenen Grenzabfluss einen unzulässig hohen Oberwasser-Stauspiegel auf Kote 785,4 m ü.M. (Bild 3). Als Ursache wurde eine starke Einschnürung im Stollenprofil auf einen reduzierten Durchflussquerschnitt infolge ungenügend ausgerundeter Kanten vermutet. Im Stollen selbst herrschte im Anschluss an den einschnürenden Eintrittsquerschnitt schiessender Freispiegelabfluss. Mit der Ausrundung der Kanten am Stollenprofil konnte wohl die Kontraktion etwas vermindert und demzufolge der Stauspiegel auf Kote 784,2 m ü.M. abgesenkt werden. Der Abschlussdamm wäre aber immer noch überflutet worden.

Weitere Überlegungen deckten eine zusätzliche Verbesserungsmöglichkeit auf: Nach dem Kontinuitätsgesetz sollte das Hochwasser von 175 m³/s den Stollen von 25 m² Querschnitt mit einer Geschwindigkeit von 7 m/s durchfliessen. Bei kontraktionsfreier Einströmung in den Stollen müsste der aufgestaute Wasserspiegel um die Geschwindigkeitshöhe $v^2/2g = 2,50$ m über der Drucklinie liegen. Die gemessene Drucklinie lag schon kurz nach dem Stollenportal leicht unter dem Stollenscheitel (Kote 719,6 m ü.M.). Der tatsächliche Wasserspiegel auf Kote 784,2 m ü.M. befand sich nahezu um die doppelte Geschwindigkeitshöhe über der Drucklinie. Dieser erhöhte Aufstau konnte seine Ursache nur in der immer noch starken Einschnürung beim Stolleneintritt und in den Energieverlusten der anschliessenden Ablösungen haben. Eine Vergrösserung des Stolleneintrittsquerschnittes brachte Abhilfe. Im Modell wurden die ersten 12 m des prismatischen Stollens durch einen sich von 40 m² auf 25 m² Querschnittsfläche verjüngenden Konus ersetzt. Mit der allmählichen Verengung des Einlaufquerschnittes wurde die durchflusshemmende Einschnü-

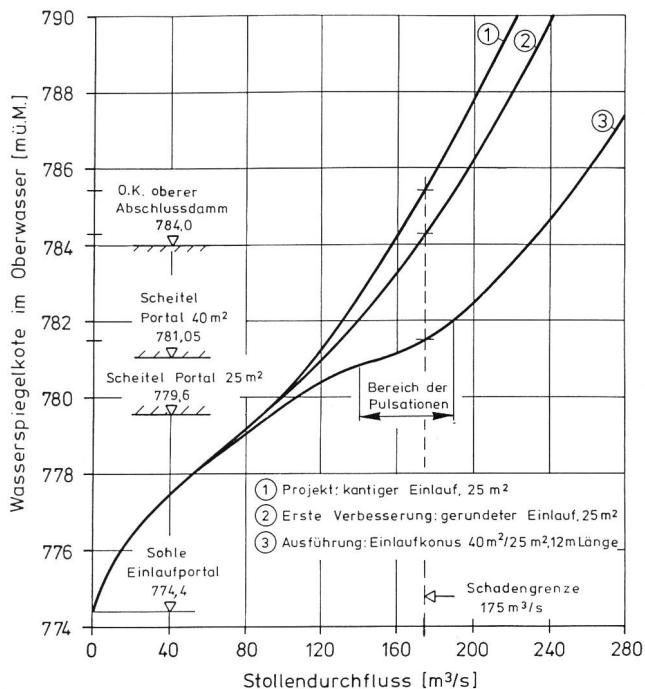


Bild 3. Hydraulische Charakteristik des Bauumleitstollens.

rung weiter vermindert. Der Stauspiegel sank auf die Kote 781,4 m ü.M. (Bild 3). Mit einem Mehrausbruch von etwa 60 m³, das sind 2,5% des gesamten Stollens, war es möglich, die Aufstauhöhe vor dem Abschlussdamm abzusenken und dessen Schüttvolumen wesentlich zu vermindern. Am Stollendurchfluss zwischen 140 m³/s und 190 m³/s zeigten sich Pulsationen, indem mitgerissene Luftpakete am Stollenende in unregelmässigen Intervallen austraten. Der Übergang vom Freispiegelabfluss zum Abfluss unter Druck erfolgt nicht bei einem festen Durchfluss, er ist instabil innerhalb des erwähnten Bereichs. Diese allenfalls kurzzeitig auftretenden Betriebszustände sind für den Bauumleitstollen ohne Nachteil.

3. Hochwasserentlastung

Die Hochwasserkapazität der gesamten Stauanlage (Bild 1) verteilt sich auf eine Schussrinne an der rechten Talflanke, auf einen festen Überfall an der Mauerkrone und auf zwei gleiche Grundablässe. Im Modell waren Kapazität und Funktionstüchtigkeit dieser Anlageteile zu untersuchen. Es war der Nachweis zu erbringen, dass die Entlastungsorgane der geltenden Talsperrenverordnung genügen, wonach das Projekthochwasser von 550 m³/s auch dann schadlos und ohne unzulässigen Überstau abfliessen soll,

wenn das leistungsfähigste Entlastungsorgan nicht betriebsfähig ist.

Zunächst wurden die Vor- und Nachteile verschiedener Rinnenkonzepte studiert und gegeneinander abgewogen. Fest stand die Klappenregulierung des Entlastungsabflusses am oberen Rinnenende. Dazu dient eine 8,0 m breite Stauklappe von 3,75 m Höhe, welche in geschlossener Position das Stauziel auf Kote 823,75 m ü.M. zu halten vermag. Auf die Modellierung einer asymmetrischen Rinne oder einer langen Rinne, die bis in die Schlucht hinunter (Kote 772 m ü.M.) reicht, wurde aufgrund der nachstehenden Überlegungen verzichtet: In einer Schussrinne treten infolge des stark schiessenden Abflusses zwangsläufig Stosswellen auf. In asymmetrischen Rinnen sind die Stosswellen selbst dann schwer kontrollierbar und erfordern hohe Seitenwände, wenn die Rinnensohle mit Stosswellenkompensatoren versehen ist. Eine kürzere Schussrinne mit abschliessender Sprungschanze ist kostengünstiger, und im Fall von Solis wird auch mit einer solchen Lösung die Talsperre nicht gefährdet. Im untern Teil der ungetakteten Schussrinne würden Fliessgeschwindigkeiten bis über 30 m/s auftreten. Bei längerer Einwirkungszeit wären Kavitationserosionsschäden am Beton die Folge. Außerdem wiegt der bauliche Eingriff in der natürlichen Landschaft weniger schwer.

Die Ausführungsvariante erhielt eine Sprungschanze und ist im Grundriss symmetrisch. Vom abspringenden Wurfstrahl wird erwartet, dass er die Schanze gebündelt und in gezielter Richtung verlässt und dass er auch bei geringeren Entlastungswassermengen die Talsohle erreicht.

Die erste Versuchsviante bestand aus einem Rechteckkanal mit der konstanten Breite von 8,0 m, einem Gefälle von 66% und einer in Längsrichtung verschiebbaren Sprungschanze. Der Krümmungsradius der Sprungwanne betrug 12 m oder etwa das 4fache der Abflusstiefe und der Absprungwinkel 22°.

Das hydraulische Verhalten dieser Rinne befriedigte insofern nicht, als die Abflusstiefe innerhalb der Querprofile infolge einer Stosswelle stark variierte. Den Ausgangspunkt dieser Welle bildete der Trennpfeiler zwischen dem Rinnenlauf und der festen Überfallkrone der Staumauer. Die stark gekrümmte Pfeilerwand (Bild 4) führte zu einer rotierenden Umströmung und einer Wasserspiegelsenkung auf der linken Einlaufseite.

Bei Wassermengen unter 8 m³/s war zudem der Absprung eines schiessenden Wurfstrahles nicht möglich, weil sich in der Umlenkwanne ein Wassersprung bildete. Bei grösseren Wassermengen hingegen gefährdete der Wurfstrahl eine exponierte Felspartie auf der linken Schluchtseite.

Diese erste Versuchsviante wäre auch zur baulichen Ausführung nicht optimal gewesen. Die durchgehende Breite von 8 m hätte in der steilen rechten Talflanke aufwendige Fundationen bedingt, und die mit 66% fallende Sohle hätte zum Betonieren eine Konterschalung erfordert.

In mehreren Schritten wurde die Schussrinne verbessert (Bild 5). Die Zielrichtung erfuhr eine Drehung um 18° zum rechten Talhang, womit die exponierte Felspartie ausserhalb des Aufprallbereiches zu liegen kommt. Die Rinnenneigung wurde auf 29% herabgesetzt, das Grenzgefälle, das noch ein Betonieren ohne Konterschalung zulässt. Eine kontinuierliche Verjüngung der Rinnenbreite von 8 m bei der Stauklappe auf 4 m bei der Absprungkante verhilft zu einer günstigeren Konstruktion im steilen Hang und führt zu einem kompakteren Wurfstrahl. Mit der Reduktion des Absprungwinkels auf 10° verlassen auch kleine Abflüsse bis hinunter auf 2 m³/s die Umlenkwanne schiessend.

Die Form des Trennpfeilers wurde ebenfalls schrittweise

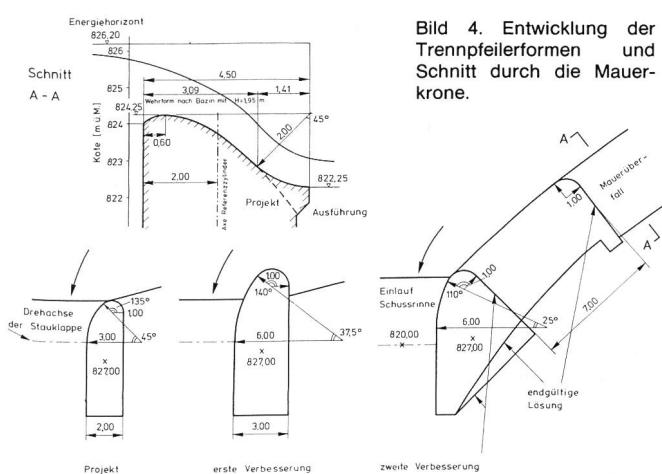


Bild 4. Entwicklung der Trennpfeilerformen und Schnitt A-A durch die Mauerkrone.

Bild 5. Längenprofil durch die Schussrinne.

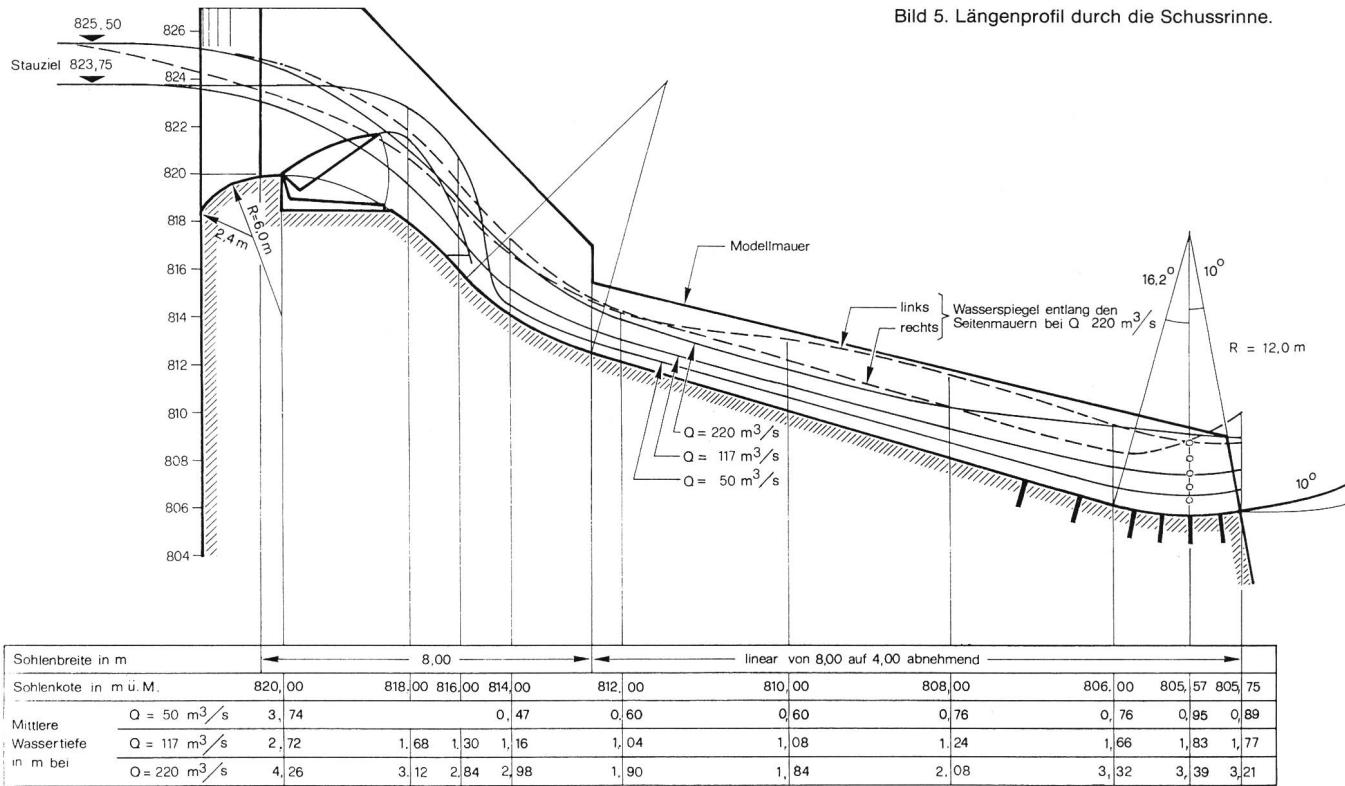
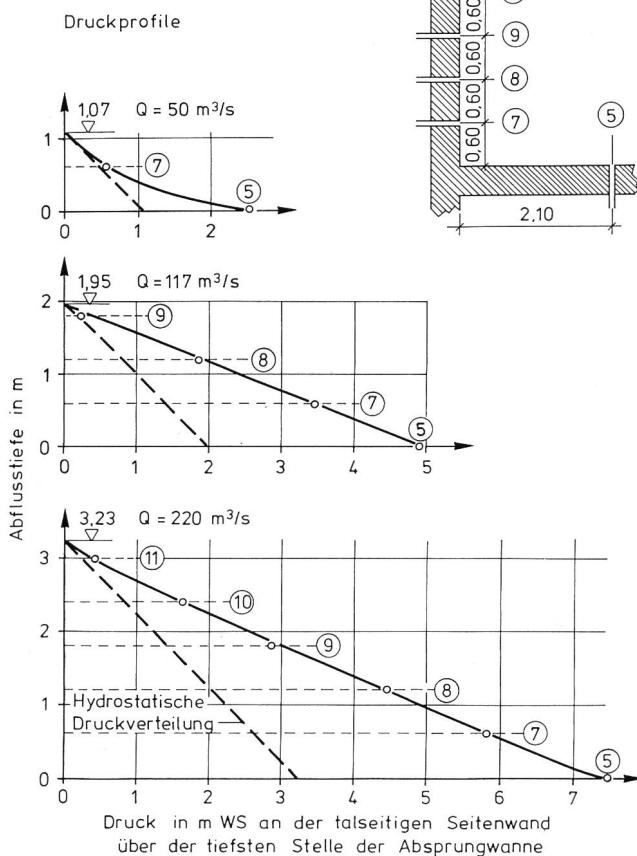
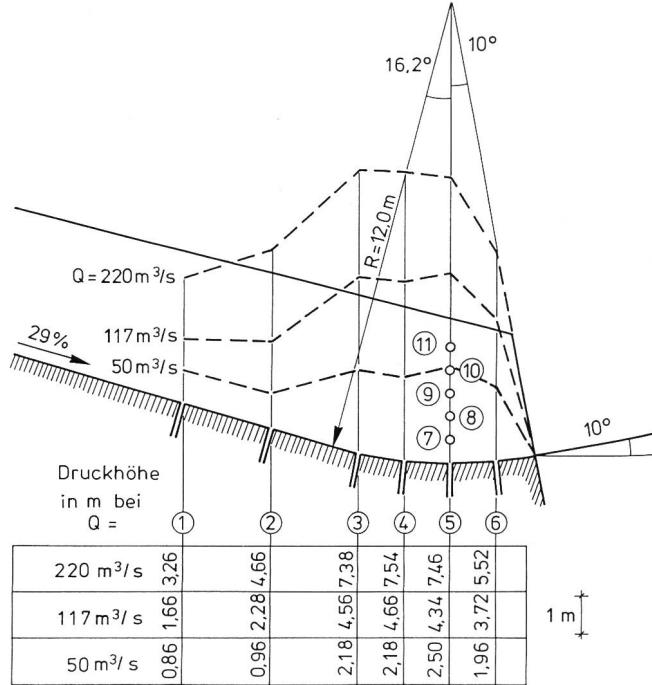


Bild 6. Drucklinienverlauf und Druckverteilungen in der Umlenkwanne der Schussrinne.



verbessert, wie Bild 4 zeigt. Mit der Wahl eines erweiterten Korbogens und eines ins Oberwasser vorspringenden Pfeilerkopfes wurden die Wasserspiegelsenke an der Pfeilerwand und damit die Stosswellenerzeugung in der



Schussrinne entscheidend vermindert. Weil der rechte Talhang dem Strahl des Mauerüberfalls ausgesetzt und dadurch gefährdet worden wäre, erhielt der Trennpfeiler in einem letzten Verbesserungsschritt einen Ansatz über der Mauerkrone.

Im Zusammenhang mit der statischen Bemessung interessierte die Druckverteilung auf die Schussrinnenseitenwände im Bereich der Absprungwanne. Infolge der Umlenkkräfte ergeben sich dort gegenüber der hydrostatischen Druckverteilung erhöhte Drücke, wie Bild 6 zeigt. Bemerkenswert ist der Vergleich der gemessenen Drücke mit jenen, die aus einer kurzen theoretischen Betrachtung hervorgehen.

Die Druckverteilung im Strahlquerschnitt an der tiefsten Stelle der Wanne berechnet sich nach der Formel [1]:

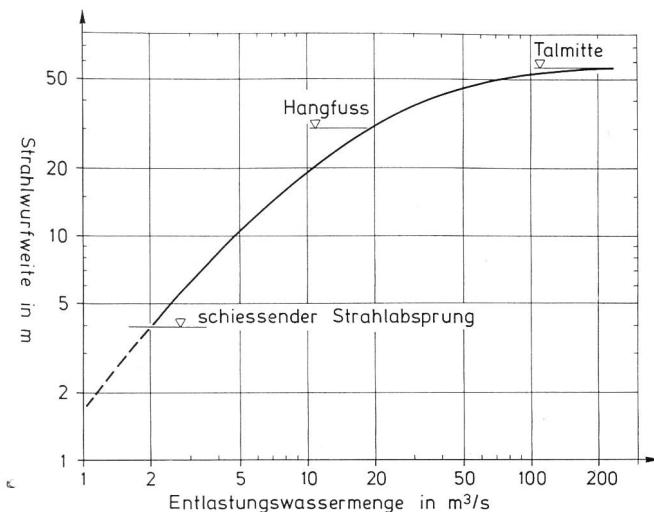


Bild 7. Sprungweite des Wurfstrahles in Abhängigkeit des Entlastungsabflusses.

$$p = \rho g (h - z) + \frac{\rho Q^2}{2(b \ln r_i/r_a)^2} \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_a^2} \right)$$

Der gesuchte Druck wird durch p ausgedrückt. r_a ist der äussere Krümmungsradius des Strahles und r_i der innere. Q ist der Abfluss, b die Gerinnebreite, $h = r_a - r_i$ die Abflusstiefe, z der Abstand zur Sohle, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ die Erdbeschleunigung und $\rho = 1 \text{ t/m}^3$ die Dichte des Wassers. Es ist zweckmässig, den Druck durch eine Höhe anzugeben. Für den Druck an der Sohle ($z = 0$) wird demnach

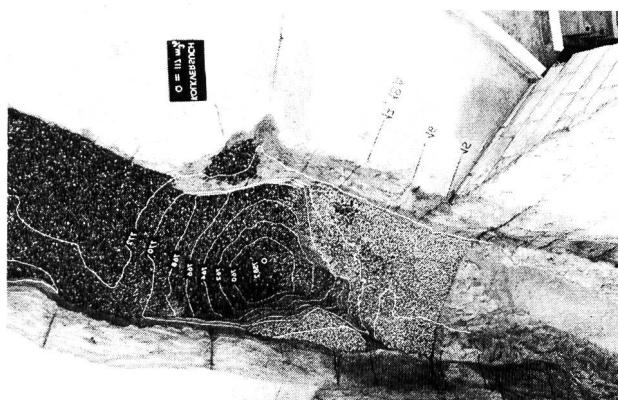
$$\frac{p}{\rho g} = h + \frac{Q^2}{2g(b \ln r_a/r_i)^2} \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_a^2} \right)$$

Herausgegriffen sei das Zahlenbeispiel des extremen Schussrinnenabflusses von $220 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Wannenbreite an der tiefsten Stelle beträgt $b = 4,32 \text{ m}$ und die gemessene mittlere Abflusstiefe $h = 3,39 \text{ m}$. Durch Einsetzen in die obige Formel erhält man

$$p/\rho g = 3,39 \text{ m} + 7,85 \text{ m} = 11,24 \text{ m}$$

Im Vergleich dazu beträgt die gemessene Druckhöhe bei der tiefsten Stelle der Wanne etwa $7,5 \text{ m}$ und ist somit geringer (Bild 6). Dieser Sachverhalt lässt sich dadurch erklären, dass sich die ankommende Translationsströmung in der kurzen Umlenkwanne nicht vollständig in eine Rotationsströmung umwandeln kann und die Zentrifugalbeschleunigung deshalb noch nicht den Endwert angenommen hat. Außerdem wirkt sich der Druckabfall vor der Absprungkante entgegen der Fliessrichtung bis in die Wanne hinein aus. Der Modellversuch deckt hier ein Problem auf, das auf dem Papier nur unzureichend gelöst werden kann.

Bild 8. Topographie des Kolkes unterhalb der Schussrinne. Der Wurfstrahl bohrte sich rund 15 m tief ins Flussbett ein.



Zwischen dem Schussrinnenabfluss und der Strahlwurfweite besteht die gemessene Beziehung, wie sie in Bild 7 dargestellt ist. Bei kleinen Abflüssen zehren die Reibungsverluste in der Rinne einen nicht geringen Teil der verfügbaren Energie auf. Der Wurfstrahl erreicht die Talsohle infolge der reduzierten Absprunggeschwindigkeit nicht.

Der aufprallende Wurfstrahl lässt im Bett der Albula einen beträchtlichen Kolk erwarten. Im Modell wurde der wenig unter der Flussohle liegende Bündner Schieferfels durch eine Split-Kalk-Zement-Mischung simuliert. Mit diesem Verfahren können Kolkformen erzeugt werden, die der Wirklichkeit mindestens in qualitativer Hinsicht nahekommen. Bild 8 zeigt ein Versuchsergebnis, den Endzustand bei einem Schussrinnenabfluss von $117 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Koltiefe beträgt 15 m oder ungefähr einen Drittel des Gefälles zwischen Stauspiegel und Schluchtgrund. Grössere Abflüsse führen nicht zu tieferen Kolkungen, weil die Talenge unter der etwa 300 m talwärts liegenden, alten Solisbrücke ein Wasserpolster aufstaut, das den Aufprall des Wurfstrahls dämpft.

4. Mauerüberfall

Sollte einmal ein aussergewöhnliches Hochwasser auftreten, zu dessen Entlastung die Schussrinne und beide Grundablässe nicht genügen, so steht noch ein 57 m breiter, hydraulisch geformter Mauerüberfall zur Verfügung. Um Verstopfungen durch Treibholz und einen unkontrollierbaren Höherstau auszuschliessen, wurde auf eine Dienstbrücke mit Zwischenpfeilern über der Mauerkrone verzichtet. Der erste Entwurf sah keine Sprungschanze vor (Bild 4). Mittlere und kleinere Überfallwassermengen konnten sich mangels einer geeigneten Kante nicht von der Mauer ablösen und rannen an der Luftseite herunter. Eine offensichtliche Verbesserung brachte eine neue, mit einer Sprungnase ausgestattete Mauerkrone (Bild 4). Das längs des gesamten Mauerüberfalls gleichmässig überlaufende Wasser erreicht in freiem Fall den Schluchtgrund (Bild 2). Die Aufprallzone des Strahls befindet sich in ausreichendem Abstand vom Fuss der luftseitig leicht überhängenden Mauer, so dass die Bauwerkssicherheit gewahrt bleibt.

5. Fassung

Das Triebwasser wird dem Stausee Solis im Fassungsturm am rechten Talhang entnommen. Die beiden Schrägrechen im Einlauf sind der rechten Talseite zugekehrt und nicht nach der allgemeinen Strömungsrichtung im Stausee orientiert. Die Zuströmung ist deshalb gezwungen, bis zum Eintritt in den Fassungsturm bei der Turmecke links des Rechens eine Drehung um einen Winkel von 135° zu vollziehen. Strömungen, die so starken Richtungsänderungen unterworfen sind, neigen bei vorstehenden Hindernissen zu Ablösungen mit Rückwirbeln. Solche Wirbel mit vertikaler Achse bildeten sich denn auch an der Wasseroberfläche vor dem Einlaufrechen. Sie haben die Eigenschaft, der Fassung vermehrt Geschwemmsel zuzuführen, stören eine gleichmässige Einströmung und begünstigen das Ansaugen von Luft. Zur Abhilfe wurde die linke Turmecke mit einem 6 m hohen, korbbogenförmigen Leitflügel versehen (Bild 1), dessen Oberseite auf der Staumauerkote liegt. Die Strömung ist nun frei von Ablösungen, schmiegt sich an den Leitflügel an und durchläuft den scharfen Richtungswechsel zur Fassung ohne störende Wirbel.

[1] Press-Schröder, Hydromechanik im Wasserbau, Wilhelm Ernst Verlag, Berlin

Adresse des Verfassers: Dr. Andreas Huber, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidg. Technischen Hochschule Zürich, EZH-Zentrum, CH-8092 Zürich.