

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	83 (1992)
Heft:	2
Artikel:	Ausbau der Wasserkraft im 20. Jahrhundert
Autor:	Schnitter, N.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-902779

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: 07.01.2026

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

Ausbau der Wasserkraft im 20. Jahrhundert

N. Schnitter

Nachdem im 19. Jahrhundert bau-, maschinen- und elektrotechnische Errungenschaften die Grundlagen dafür geschaffen hatten, erfolgte im 20. Jahrhundert der Vollausbau des hydroelektrischen Potentials der Schweiz. Der Schwerpunkt dieses Ausbaus lag in den Jahren 1950–1970. Um eine Übersicht über die große Zahl der Anlagen zu gewinnen, wird die Entwicklung ihrer Hauptteile nachgezeichnet, das heisst der Stauhaltungen, Wasserfassungen, Triebwasserleitungen und Maschinenhäuser.

Sur la base des progrès en génie civil, mécanique et électrotechnique pendant le 19^e siècle, le potentiel hydro-électrique de la Suisse fut complètement développé dans ce siècle, principalement de 1950 à 1970. Pour gagner une vue d'ensemble sur le grand nombre d'aménagements construits on retrace l'évolution de leurs éléments, c'est-à-dire barrages, prises d'eau, conduites et centrales.

Auszugsweiser Vorabdruck aus dem Buch N. Schnitter: Die Geschichte des Wasserbaus in der Schweiz, Olythus 1992.

Die bau- und maschinentechnischen Errungenschaften und Erfahrungen des 19. Jahrhunderts, insbesondere die Einführung der Elektrizität als Energieübertragungsmedium gegen die Jahrhundertwende, bildeten die Grundlage für den Vollausbau der schweizerischen Wasserkräfte in diesem Jahrhundert. Neben Holz und Uran ist Wasserkraft die wichtigste heimische Energiequelle. Holz kann man jedoch nur in jenen Grenzen zur Energiegewinnung einsetzen, die von Hochwasserschäden infolge früheren Raubbaus an den Wäldern aufgezeigt wurden und im Bundesgesetz über die Forstpolizei aus dem Jahre 1876 festgelegt sind. Uran wiederum tritt nur in sehr verdünnter Form auf.

Wie Bild 1 zeigt, verlief der Ausbau der Schweizer Wasserkräfte bis zur Annäherung an den Sättigungswert in den 1970er Jahren erstaunlich regelmässig und praktisch unberührt von den grossen weltweiten Erschütterungen, welche das 20. Jahrhundert heimsuchten.

Um die Jahrhundertwende betrug die jährliche Zuwachsrate 7%, was eine Verdoppelung der installierten Leitungen in zehn Jahren bedeutet. Zwischen 1910 und 1970 bewegte sich die Zuwachsrate um 5%, um danach auf 1,5% zurückzugehen. Insgesamt ergab sich in den 100 Jahren von 1890 bis 1990 eine Leistungssteigerung um den Faktor 125! Der Schwerpunkt lag in den beiden Jahrzehnten wirtschaftlicher Hochkonjunktur zwischen 1950 und 1970, in denen der Ausbau der Wasserkraft als der am raschesten erschliessbaren Quelle zusätzlicher Energie forciert wurde.

Damals wurden pro Jahr bis zu einer halben Milliarde Franken (nach Zeitwert) oder bis 1,5% des jeweiligen Bruttonsozialprodukts der Schweiz in die Elektrizitätswirtschaft investiert. Das bezieht sich, wohlgemerkt, nur auf die Nutzung der Wasserkraft. Den gesamtenergetischen Rahmen pro Kopf steckt Bild 2 ab, wobei hervorsticht, wie

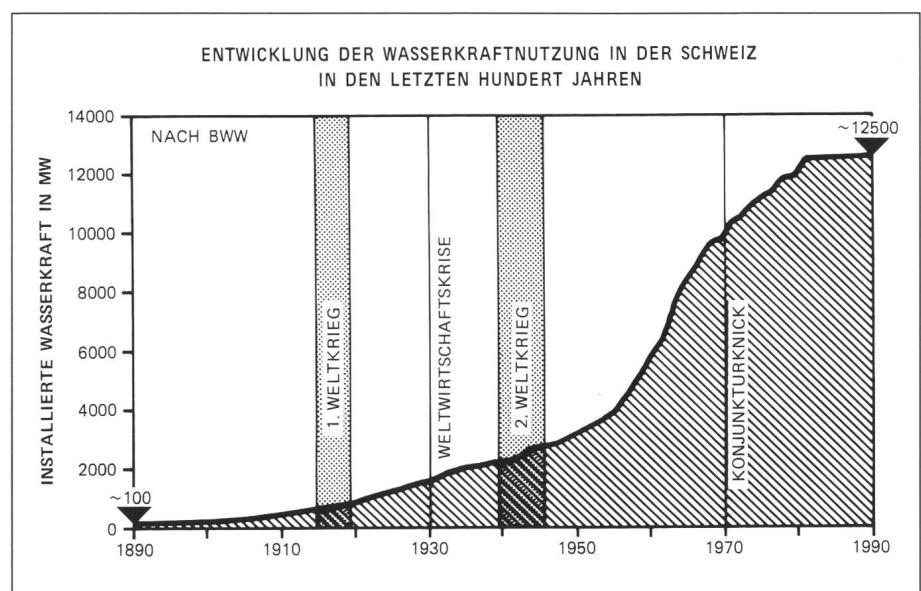


Bild 1 Entwicklung der Wasserkraftnutzung in der Schweiz in den letzten hundert Jahren

Adresse des Autors

Niklaus Schnitter, Fleinerweg 4, 8044 Zürich.

Geschichte der Wasserkraft

relativ bescheiden der Beitrag der Wasserkraft war und ist. Das röhrt daher, dass der Löwenanteil des Energieverbrauchs schon immer für Wärme eingesetzt und direkt durch Brennstoffe gedeckt wurde. Allerdings ist er heute pro Kopf dreimal so hoch wie zu Beginn des Jahrhunderts, eine Folge der – unvernünftig? – gestiegenen Ansprüche an Wohn- und Arbeitsraum und dessen Beheizung.

Auch von der Elektrizität, die bis 1970 fast ausschliesslich aus Wasserkraft stammte, wird der grössere Teil für Kochen und Beleuchtung «verbrannt». Die für motorische Zwecke verbleibende elektrische Nutzenergie entsprach Anfang des Jahrhunderts einem «Energiesklaven». Nach dem Zweiten Weltkrieg waren es bereits deren drei, während heute jedermann, Kinder und Rentner eingeschlossen, elf solcher unsichtbarer Helfer beschäftigt. Dazu kommen noch einmal gleichviele, die, wie das Auto, mit Brennstoffen gespeist werden – auch das eine Folge der gestiegenen Ansprüche, diesmal bezüglich Arbeitserleichterung und Mobilität.

Angesichts der grossen Zahl – 450 mit mehr als 300 kW und noch 35 mit über 100 MW Leistung – hydroelektrischer Anlagen (Bild 3), ist es in diesem Rahmen nicht möglich, auf die Entstehungsgeschichte auch nur einiger ausgewählter Kraftwerke einzugehen. Zudem zeichnen sich selbst die entwicklungsgeschichtlich relevanten, die nicht notwendigerweise auch die jeweils grössten sind, oft nur durch eine einzige bemerkenswerte Besonderheit

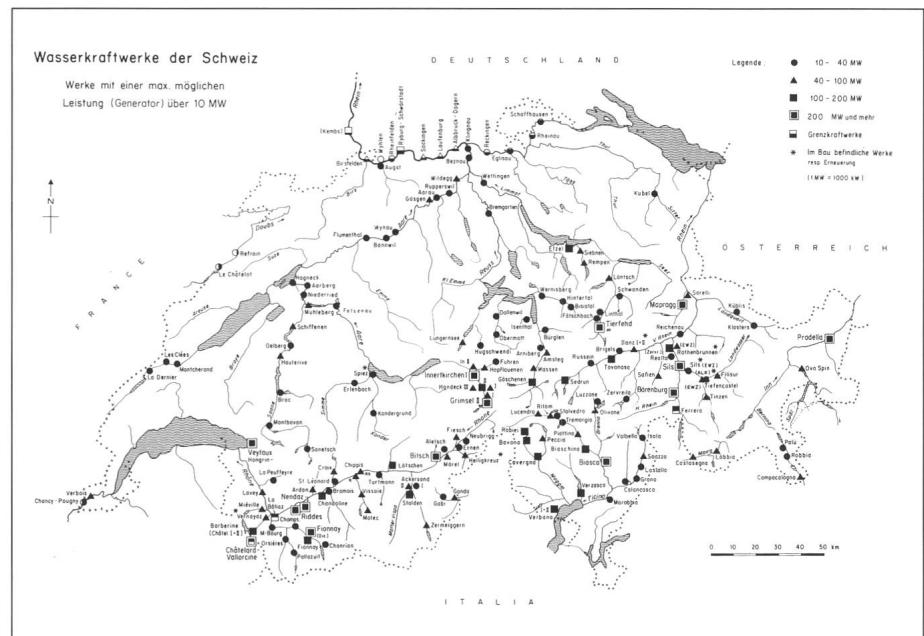


Bild 3 Karte der Schweiz mit Wasserkraftwerken über 10 MW Leistung (nach Bundesamt für Wasserwirtschaft)

aus. Deshalb wird hier die Entwicklung der Hauptbestandteile von Schweizer Wasserkraftanlagen im 20. Jahrhundert nachgezeichnet, also von Stauhaltungen, Wasserfassungen, Triebwasserleitungen und Maschinenhäusern. Elektromechanische Gesichtspunkte bleiben dabei weitgehend ausgeklammert.

Stauwehre

An den Anfang seien die Stauwehre gestellt, weil die ersten grossen Wasserkraftanlagen am Ende des 19. und zu

Beginn des 20. Jahrhunderts ja an den Flüssen des schweizerischen Mittellandes zwischen Alpen und Jura entstanden. Gelegentlich wurde bei diesen Anlagen noch an der traditionellen Technik fester, überströmter Wehrschwellen festgehalten, so zum Beispiel 1892 an der Aare bei Brugg und 1894 bei Aarau sowie 1898 am Rhein in Rheinfelden.

Wie schon erwähnt, waren 1878 für das Kraft- und Pumpwerk Letten am Platzspitz in Zürich und 1887 für die analoge Anlage La Coulouvrière am Pont de la Machine in Genf früher bewegliche Wehre gebaut worden, die auch der Seeregulierung dienten. Letten verwendete für den 2,3 m hohen Aufstau «Nadeln» (Bild 4), wie sie bereits 1861 in Luzern für die Regulierung des Vierwaldstättersees eingesetzt wurden.

Das erste Schützenwehr im modernen Sinn wurde 1896 für das Rhonekraftwerk Chèvres unterhalb von Genf fertiggestellt. Jede seiner sechs Schützentafeln von 10 m Länge und 8,5 m Höhe nahm bereits 3,5 Meganewton (MN) Wasserlast auf (Bild 5 [1]). Weit unter diesem Wert blieben – trotz ihrer beachtlichen Spannweiten von 22,2 m – die 1902 dem festen Wehr in Rheinfelden nachträglich aufgesetzten acht Schützen, weil sie nur einen Meter hoch sind [2]. Noch vor dem Ersten Weltkrieg wurde die Schützenbelastung rasch erhöht. 1914 erreichte sie beim aargauischen Rheinkraftwerk Laufenburg den bis heute ungebrochenen Schweizer Rekord von rund 22 MN. Dabei wurden die vier ebenen Schützen, welche die bis zu 16,0 m hohen

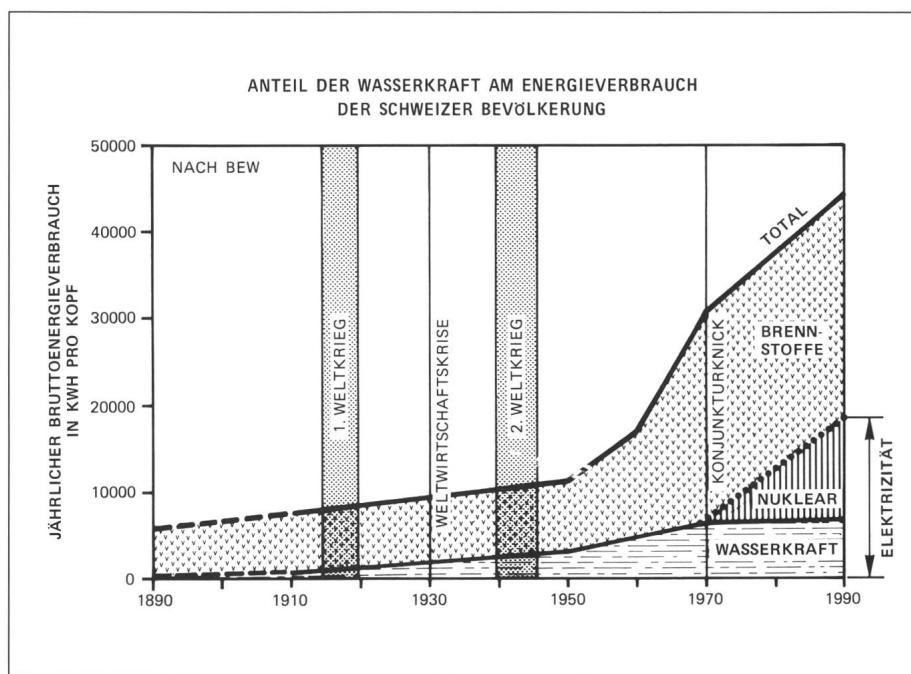
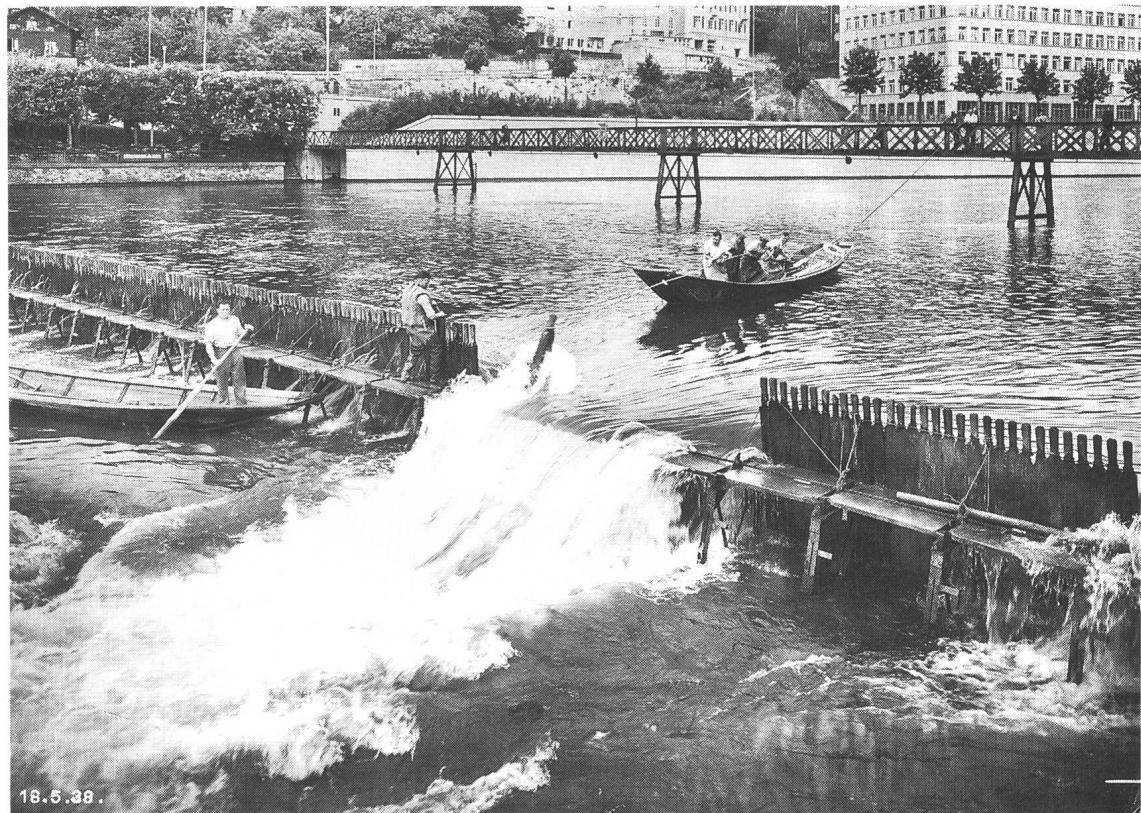


Bild 2 Anteil der Wasserkraft am Energieverbrauch der Schweizer Bevölkerung

Bild 4
Nadelwehr an der Limmat in Zürich;
1951 durch ein
Dachwehr ersetzt

Foto IBA, Zürich



Wehröffnungen von 17,3 m Weite abschlossen, in zwei Teile unterteilt. Diese liessen sich entweder einzeln zum «Überströmen» senken oder zum «Unterströmen» heben. Man konnte sie aber auch im Paket anheben, um dann den Maximaldurchfluss von 5400 m^3 je Sekunde – einen der höchsten in der Schweiz – sicherzustellen. Gleichzeitig

wurde das Schützengewicht relativ zum aufgenommenen Biegemoment, dem Produkt aus Wasserlast und Wehröffnung, auf etwa die Hälfte vermindert (Bild 5).

Eine weitere, wirtschaftlich bedeutende Verminderung des relativen Schützengewichts brachte nach dem Zweiten Weltkrieg die Einführung von

Segmentschützen, die in der Vertikalen wasserseits gekrümmt waren. Beim aargauischen Kraftwerk Rupperswil-Auenstein wurden sie 1945 noch als Doppelschützen ausgeführt [1], ab dem 1952 fertiggestellten Kraftwerk Wildegg-Brugg im Aargau als Segmentschützen mit aufgesetzter Überfallklappe [3].

Anfang der 1960er Jahre setzte sich die Betätigung der Schützen mit ölhdraulischen Kolbenpressen anstelle der bisherigen Kettenwindwerke durch. International gesehen gehören die Schweizer Schützenwehre aber eher zu den kleinen Anlagen, hat man doch andernorts inzwischen über 40 MN Wasserlast pro Schütze erreicht [4].

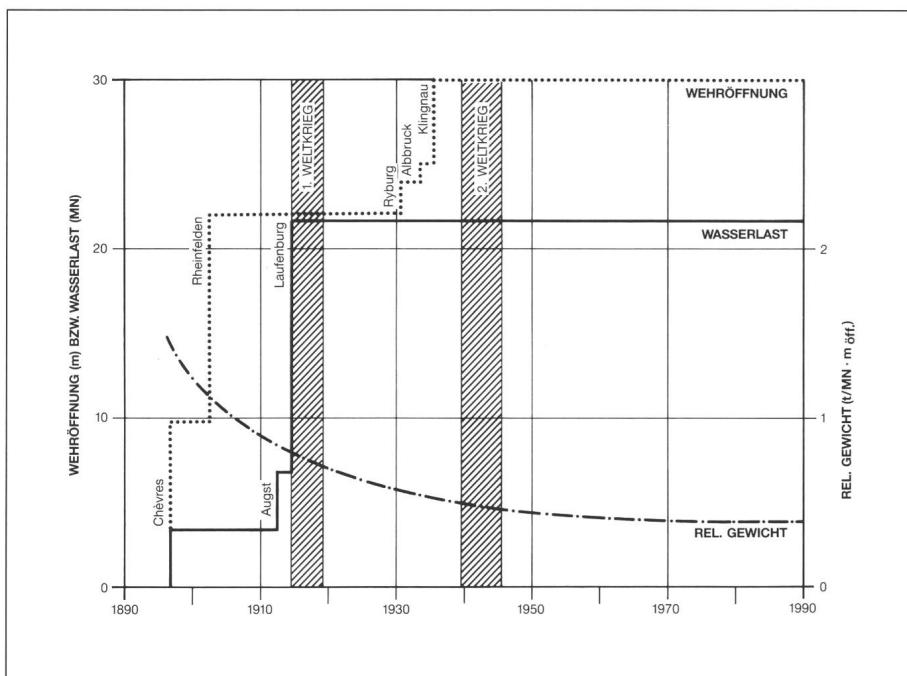


Bild 5 Entwicklung der Hauptcharakteristiken schweizerischer Schützenwehre

Caissons und Spundwände

Die Wasserlasten müssen über Wehrpfeiler in den Untergrund abgeleitet werden. Wo tragfähiger Fels in Oberflächennähe vorhanden war, wie bei den Wehren Chèvres und Rheinfelden, stellten sich keine besonderen Probleme. Doch schon beim 1900 gebauten Wehr am Hagneck-Kanal zum Bielersee, der in den Jahren 1874–1891 für die erste Juragewässerkorrektion gebaut worden war, ergab sich die Notwendigkeit einer tieferen Gründung. Hier trat der Unternehmer und ETHZ-Professor, Dr. h. c. Conradin Zschokke,

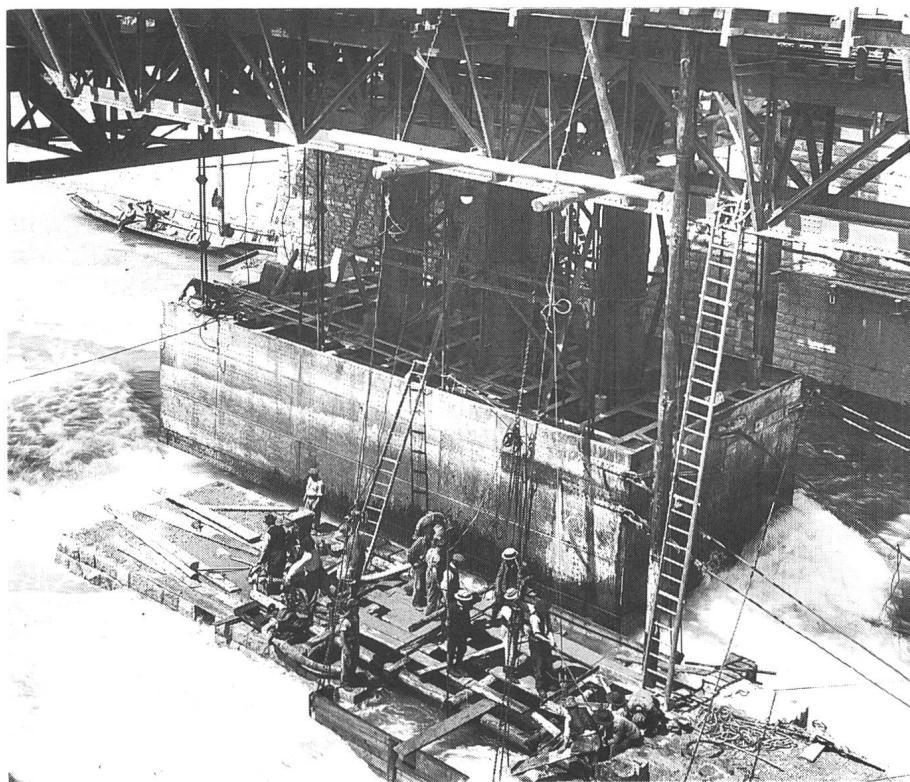


Bild 6 Caissons für die Gründung des Rheinwehres Laufenburg bei Beginn der Absenkung
Foto Kraftwerk Laufenburg

1842–1918, auf den Plan, der vor allem im Ausland umfassende Erfahrung in «Druckluftgründungen» erworben hatte. Dabei handelte es sich um die Absenkung von Caissons, das sind unten offene, grosse Kisten aus Stahl und später aus Eisenbeton, in denen man einen dem äusseren Wasserdruck entsprechenden Luftdruck aufrechterhielt. Arbeiter und Material wurden meist über separate Vertikalschächte ein- und ausgeschleust (Bild 6 und 7). Gelegentlich verwendete man Caissons auch als wiederverwendbare, bewegliche Arbeitskammern in der Art von Taucher-glocken. Einschliesslich des 1956 vollendeten Rheinkraftwerks Birsfelden [5], 3 km östlich von Basel, wurden die meisten grossen Schweizer Wehre mit Caissons gegründet.

Danach kam die Methode ausser Gebrauch, weil sie sich für die nach dem Zweiten Weltkrieg aus den USA kommende, zunehmende Mechanisierung der Bauausführung kaum eignete. Zudem war bald niemand mehr bereit, die beschwerlichen Arbeitsbedingungen unter Druckluft in Kauf zu nehmen. Grossen Aufschwung hingegen nahmen die Anfang des Jahrhunderts entwickelten wasserdichten Spundwände aus ineinandergreifenden Stahlbohlen, die in den Boden gerammt wurden. Sie erlaubten – mit entsprechenden Verstrebungen bzw. Verankerungen – of-

fene Aushübe in Lockergesteinen bis tief unter den Grundwasserspiegel, machten aber auch den raschen Bau von – oft in Zellen unterteilten – Fangdämmen für provisorische Flussumleitungen oder zur Bildung von trockenen Baugruben selbst inmitten des Gewässers möglich.

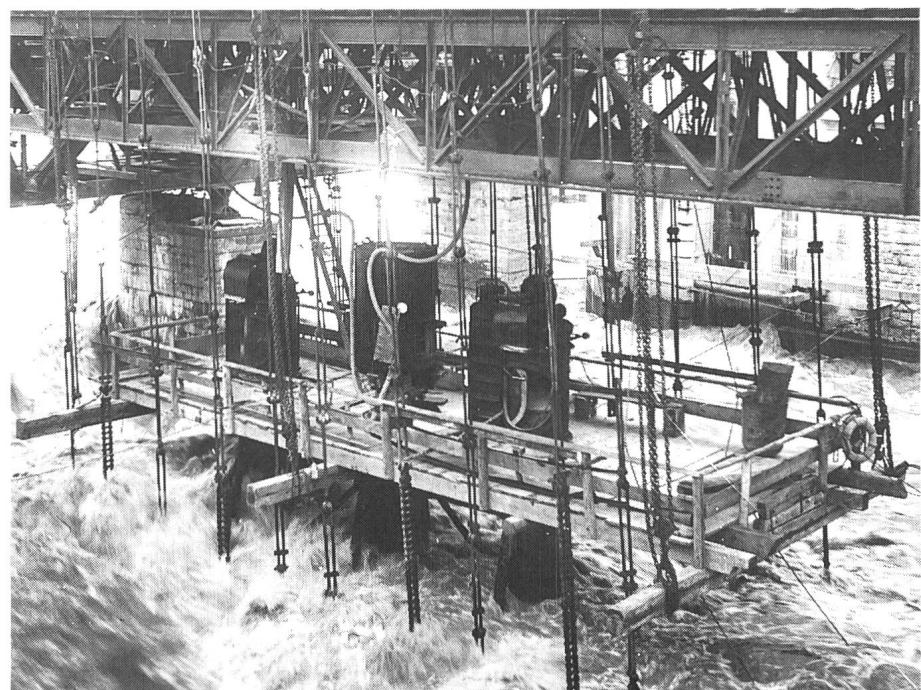


Bild 7 Caissons für die Gründung des Rheinwehres Laufenburg nach Abschluss der Absenkung
Foto Kraftwerk Laufenburg

Um die Entwicklung der schweizerischen Wehrbautechnik über mehr als 80 Jahre zusammenzufassen, gibt es wohl kaum ein besseres Beispiel als den Vergleich zwischen dem 1902 fertiggestellten Aarewehr Beznau, 23 km nordöstlich von Aarau, und seinem 1984 vollendeten Neubau an gleicher Stelle (Bild 8 [14, 32, 33]). Beim Neubau konnte die landschaftlich relevante Höhe über dem wasserseitigen Stau drastisch, und jene über dem Unterwasserspiegel – zugleich Rückstau des Kraftwerks Klingnau – auf rund die Hälfte vermindert werden. Die viel massigere Gründung des neuen Wehres dient im wesentlichen der Auffüllung des Kolkes, der unterhalb des alten Wehres entstanden war. Um solchen Auswaschungen unterhalb des neuen Wehres vorzubeugen, wurde dessen Boden aufgrund von hydraulischen Modellversuchen so geformt, dass ein möglichst grosser Teil der Bewegungsenergie des über die Schützen fallenden oder unter ihnen durchfliessenden Wassers noch innerhalb des Wehres umgesetzt wird. Die Beherrschung von Kolkerscheinungen bildete ein weiteres wichtiges Anliegen der Wehrbautechnik im 20. Jahrhundert.

Erste grosse Talsperren

Noch im 19. Jahrhundert dienten Staubecken, wie zuvor die Mühlenteiche, lediglich der täglichen Anpassung des natürlichen Wasserdargebots an

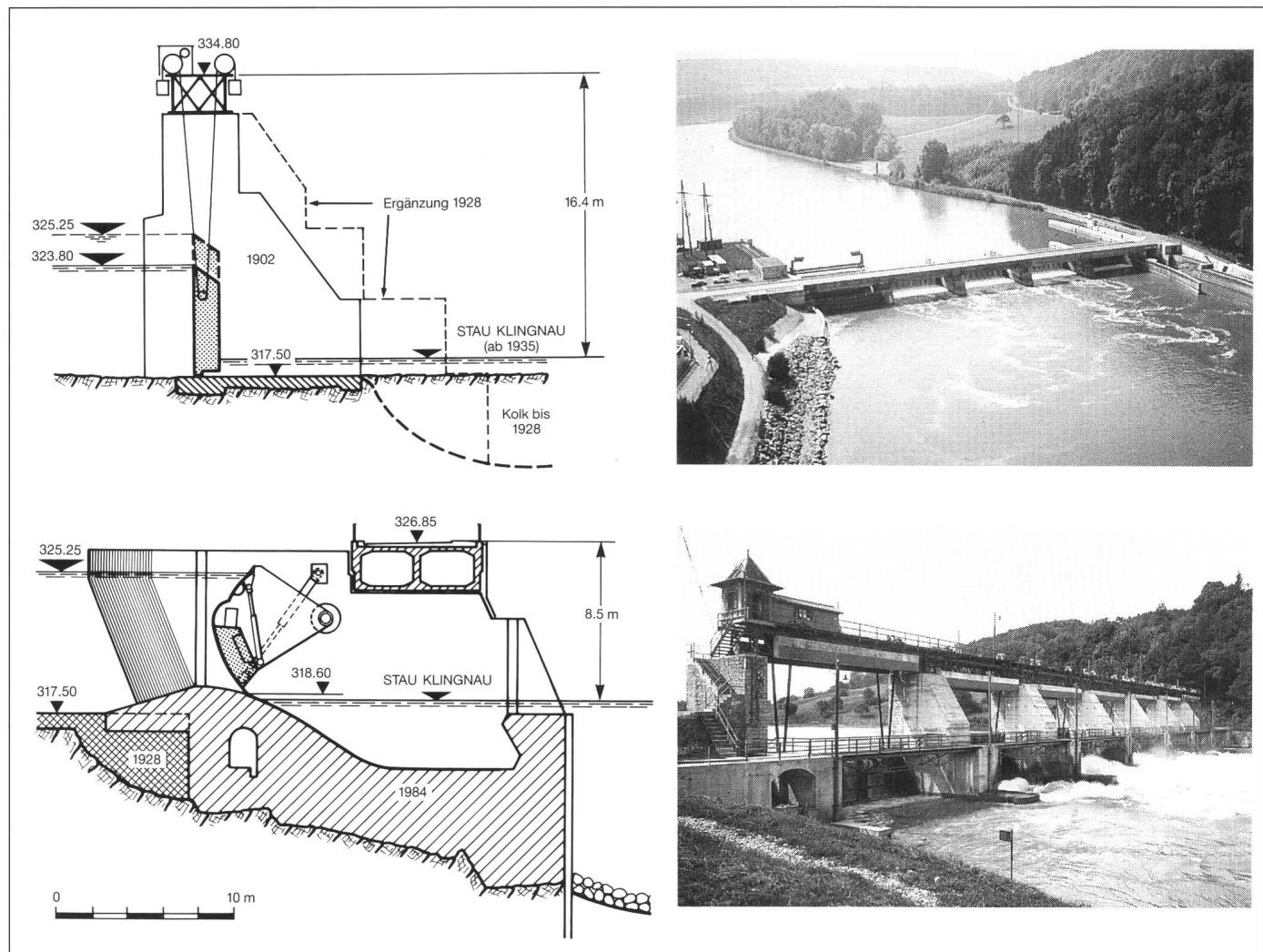


Bild 8 Querschnitt und luftseitige Ansicht des 1926–1928 ergänzten, ursprünglichen Aarewehres Beznau (oben) und seines Neubaus 1979–1984 (unten)

Fotos NOK

den Bedarf. Erst die Entstehung elektrischer Verbundnetze zu Beginn unseres Jahrhunderts (siehe vorangehenden Beitrag) ermöglichte einen Ausgleich über längere Zeiträume, und zwar meist zwischen den abflussreichen Sommermonaten und den wasserarmen Wintern. Dies erforderte aber auch erhebliche Stauvolumina bzw. Talsperren, die entsprechend hoch sein mussten, weil die meisten der nicht schon intensiv landwirtschaftlich genutzten Schweizer Täler sehr eng waren (Bild 9 [6]).

Obschon der hergebrachte Talsperrentyp der Erddamm war, bevorzugte man bei Sperrhöhen über 30 m lange Zeit Staumauern, weil deren theoretische Grundlagen damals viel weiter entwickelt waren. Einen ersten Meilenstein bildete 1920 die 55 m hohe Staumauer an der Jagne bei Montsalvens, 22 km südlich von Freiburg. Sie war zugleich die erste Bogenstaumauer Europas von der modernen Form, die wenige Jahre zuvor der Dänisch-Amerikaner Lars R. Jorgensen, 1876–1938, ent-

wickelt hatte: nicht mehr wie bislang konstante, sondern von oben nach unten zunehmende Krümmung. In Montsalvens sind auch die einzelnen horizontalen Bogen gegen die Felsauflager hin bereits stärker gekrümmmt und verdickt (Bild 10). Das Projekt stammte vom Basler Wasserbauer Dr. h. c. Heinrich Gruner, 1873–1947 (Bild 11), der die Entwicklungen in den USA seit seinem Aufenthalt dort in den Jahren 1900 und 1901 aufmerksam verfolgt hatte. Die Überprüfung der Beanspruchung des Bauwerks stützte sich auf das Verfahren von Dr. Hugo F. L. Ritter, 1883 bis 1956, mit den erwähnten Verfeinerungen durch Gruners Mitarbeiter Dr. h. c. Alfred Stucky, 1892–1969, und Dr. h. c. Henri Gicot, 1897–1982, die beide entscheidende Rollen im schweizerischen Talsperrenbau spielen sollten. Mit zahlreichen weiteren Verbesserungen diente das Verfahren zur Berechnung praktisch aller schweizerischen Bogenmauern.

Montsalvens wurde als erste Schweizer Talsperre auch mit Messinstrumen-

ten ausgerüstet, um einerseits ihr berechnetes Verhalten zu überprüfen und andererseits Erfahrungswerte für künftige ähnliche Bauten zu gewinnen. Neben den Temperaturen im Mauerinnern, die mit einbetonierten elektrischen Thermometern erfasst wurden, ermittelte man vor allem die Verformungen des Bauwerks und seiner Umgebung mit Hilfe von Vermessungen. Diese Methode wurde unter Mitwirkung des Bundesamtes für Landestopographie und anderer Stellen rasch zu hoher Perfektion gebracht und bei den meisten schweizerischen Talsperren angewendet – ein Gebiet, auf dem der schweizerische Hang zur Präzision reiche Früchte trug!

Betonschäden und Alarmanlagen

1924 bedeuteten die 112 m Höhe der Gewichtsstaumauer Schräh im Wägital, 21 km nordöstlich von Schwyz, einen

Geschichte der Wasserkraft

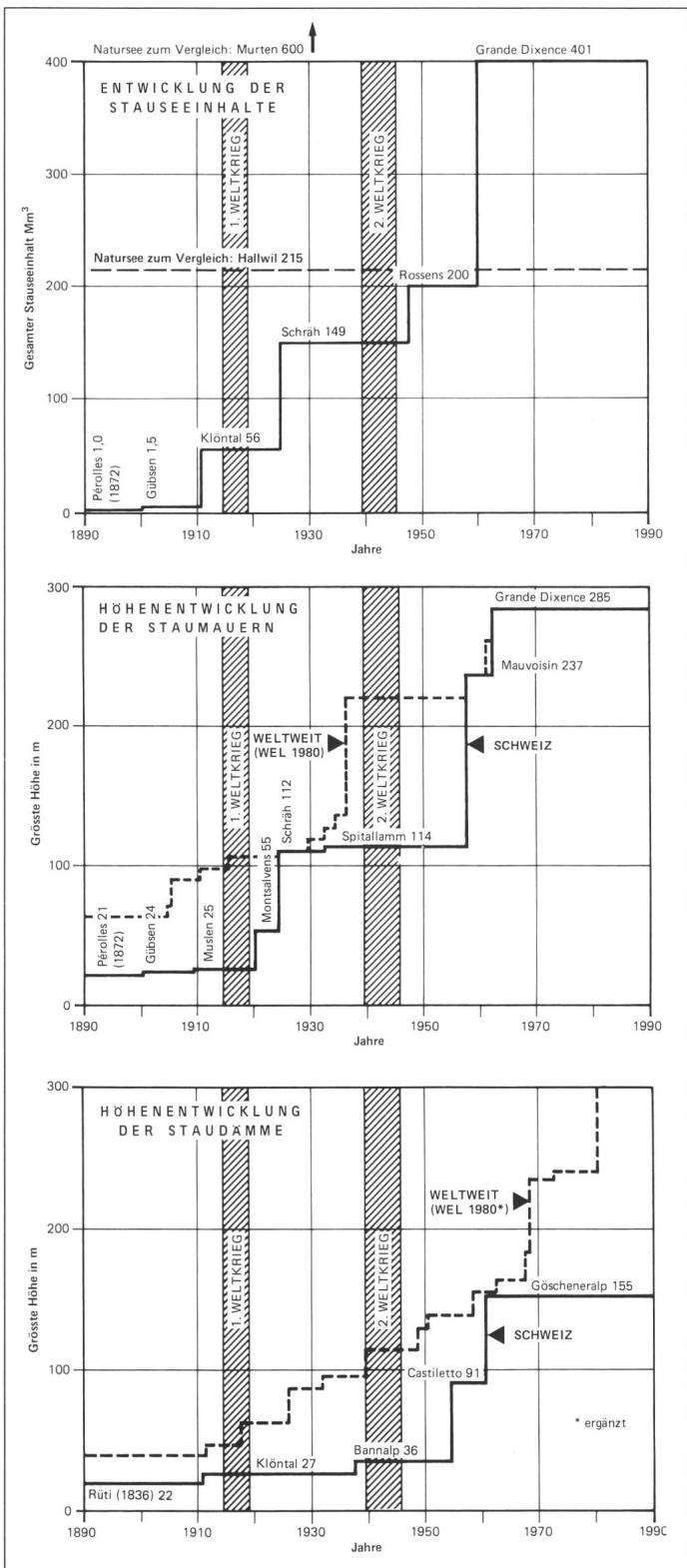


Bild 9
Entwicklung der Stausee-Inhalte in der Schweiz sowie der Höhen von Staumauern und -dämmen, mit internationalen Vergleichen

tonmauern erhebliche Schäden und aufwendige Reparaturen nach sich, zum Glück jedoch nicht an den drei Staumauern im bernischen Oberhasli, deren Bau unter Leitung von Dr. h. c. Arnold Kaech, 1881–1965, bereits begonnen hatte, darunter auch die 1932 fertiggestellte, stark gebogene und 114 m hohe Gewichtsmauer Spitalamm.

Inzwischen war die grosse Weltwirtschaftskrise ausgebrochen. Unter den neuen Zeitzeichen wurde die nächste grosse Sperre an der Dixence, 18 km südlich von Sitten, in den Jahren 1931 bis 1935 in der materialsparenden Pfeilerbauweise erstellt. Projektverfasser war der schon genannte Stucky, nunmehr Professor an der EPFL (Bild 13). Die beachtliche Betonmenge von 421 000 m³ brachte man ohne schädliche Folgen noch im Gussbetonverfahren ein. Doch bereits während ihres Baues wurde in den USA die Verdichtung von Staumauerbeton mit darin eingetauchten Vibratoren entwickelt. Diese bald auch in der Schweiz verwendete Methode erlaubte die Rückkehr zu minimalen Wassergehalten im Beton, und sie ist noch heute die übliche Art der Betonverarbeitung. Mit 87 m Höhe blieb die Dixence-Mauer bis nach dem Zweiten Weltkrieg die höchste Pfeilerstaumauer der Welt. 1957 ging sie im Stau der Grande Dixence-Sperre unter.

Eine weitere Pfeilerstaumauer wurde 1942, noch während des Zweiten Weltkrieges, zum Höherstau des natürlichen Lucendro-Sees beim St.-Gotthard-Pass in Angriff genommen. Ihre bis zu 73 m hohen Pfeiler sind erheblich schlanker als jene der Dixence-Sperre, weil man eine Konstruktion anwendete, welche der nach Kalifornien ausgewanderte Schweizer Talsperreningenieur Dr. Fred A. Noetzli, 1887–1933, Ende der 1920er Jahre entwickelt und mehrfach erfolgreich angewandt hatte.

Die Durchbrechung zweier deutscher Gewichtsstaumauern durch englische Bomben in der Nacht zum 17. Mai 1943 rief jedoch bei Schweizer Militärs und Behörden schwere Bedenken bezüglich Kriegstauglichkeit und Sabotageanfälligkeit von Talsperren hervor. In der Folge wurden zum einen Wasseralarm- anlagen unterhalb aller grösseren Stauhaltungen vorgeschrieben, zum andern musste die 1947 fertiggestellte Lucendro-Mauer durch Querriegel zwischen ihren Pfeilern verstärkt werden.

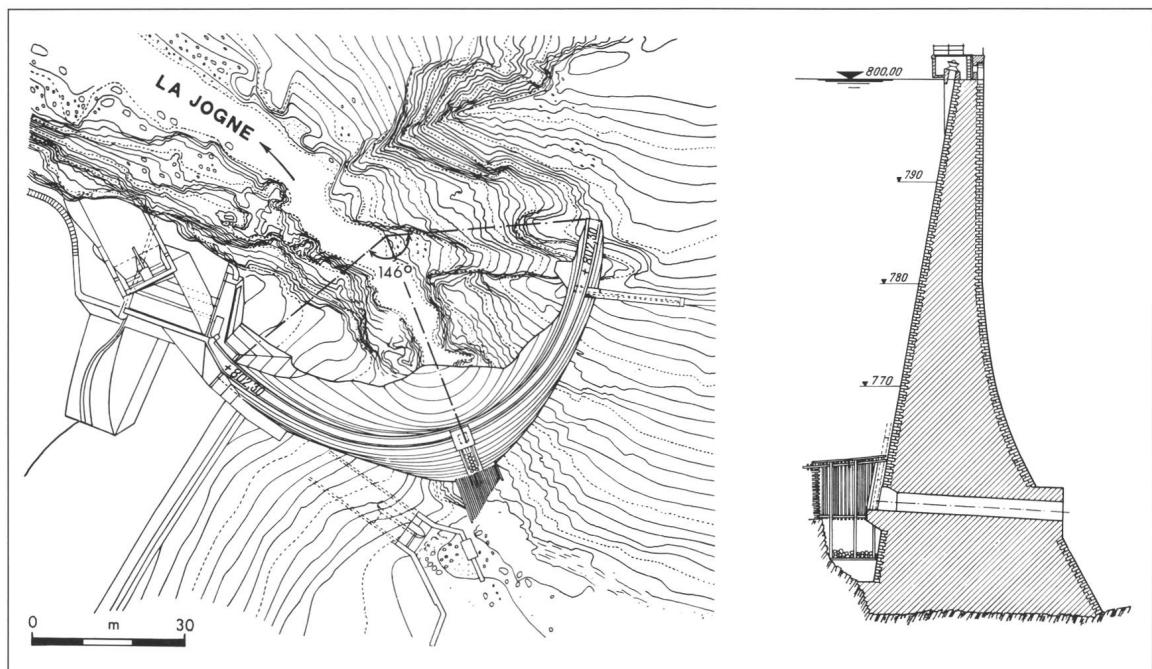
Blütezeit der Staumauern

Die Hochkonjunktur nach dem Zweiten Weltkrieg löste einen forcierten Ausbau der schweizerischen Wasser-

neuen Rekord, der für einige Jahre sogar Weltrekord blieb (Bild 9). Hinter 237 000 m³ Beton bildete sich der bis dahin grösste schweizerische Stausee. Um den Beton möglichst rasch einzubringen, griff man auf die bestechend einfache amerikanische Methode von Transport und Verteilung mittels Giessrinnen zurück (Bild 12). Um den Beton über grössere Distanzen fliessfähig zu

erhalten, musste ihm allerdings um die Hälfte mehr Wasser zugegeben werden als üblich. Die damit verbundene Festigkeitseinbusse konnte man ange-sichts der bescheidenen Betonbeanspruchungen in einer Gewichtsmauer in Kauf nehmen. Was man damals aber noch nicht wusste: Die Frostbeständigkeit stark wasserhaltigen Betons ist gering. Das zog auch an anderen Gussbe-

Bild 10
Höchster Querschnitt
und Lageplan der
Bogenstaumauer
Montsalvens



kräfte und einen entsprechenden Boom im Talsperrenbau aus. Noch während des Krieges hatte Gicot (Bild 14), die Rossens-Sperre, 10 km südlich von Freiburg, projektiert, die dann von 1945 bis 1948 als erste echte Bogenmauer seit der – nahegelegenen – von Montsalvens errichtet wurde. Durch ihre im Verhältnis zur Höhe von 83 m sehr grosse Kronenlänge von 320 m und vor allem durch ihre Gründung in weichem Sandstein zeigte sie beispielhaft die Möglichkeiten der Bogenstaumauern auf. Sie wurde denn auch zum vorherrschenden Typ im Schweizer Talsperrenbau, insbesondere unter den hohen Bauwerken (Bild 15). Von den 25 mehr als 100 m hohen Sperren sind deren 19 bzw. drei Viertel Bogenmauern. Vier dieser Sperren sind gar über 200 m hoch.

Paradoxerweise ist die höchste Talsperre der Schweiz, die 285 m hohe Grande Dixence, 18 km südlich von Sitten, eine Gewichtsmauer (Bild 16). Sie ist auch immer noch die höchste Staumauer der Welt. Für ihren Bau, der nur sechs Jahre nach Kriegsende aufgenommen wurde und bis 1961 dauerte, waren nahezu sechs Millionen m^3 Beton erforderlich. Vorbilder für solche Vorhaben, vor allem bezüglich Materialtechnik und Baumaschinen, gab es damals nur in den USA, wo der Talsperrenbau weit weniger als in Europa durch den Krieg gebremst worden war. Durch geschickte Anpassung und Verbesserung der übernommenen Methoden gelang es bin nem kurzem, die Amerikaner auf ihrem ureigensten Ge-

biet der arbeitssparenden Mechanisierung von Baustellen zu überflügeln. Das war auch nötig, weil Arbeitskräfte rasch teurer wurden und vorwiegend aus – von immer weiter her geholten – Fremdarbeitern rekrutiert werden mussten. Bei den Baufirmen förderten vor allem Albert Lüchinger, 1896 bis 1961, Oberingenieur der Locher & Cie. AG, und Dr. h. c. Gerold Schnitter, 1900–1987, Direktor der AG C. Zschokke und späterer ETHZ-Pro-

fessor, die konsequente Rationalisierung der Bauarbeiten.

Zeitparallel zur Grande Dixence und nur 10 km weiter südlich entstand 1951–1957 bei Mauvoisin die mit 237 m höchste Bogenstaumauer der Schweiz. Obschon sie 1989–1991 um 13 m erhöht wurde und nun 88% der Höhe von Grande Dixence erreicht, benötigte sie nur gut einen Drittelf von deren Betonmenge. Das Projekt stammte von dem schon genannten Alfred Stucky, der zusammen mit – bzw. gefolgt von – seinem Sohn Dr. h. c. Jean-Pierre Stucky, 1917–1991, noch für zahlreiche weitere Bogenstaumauern verantwortlich zeichnete. Das gleiche gilt für Gicot, der unter anderem die 1965–1969 gebaute Zwillingsstaumauer Hongrin, 33 km südöstlich von Lausanne, entwarf, bei der sich zwei 125 bzw. 98 m hohe Gewölbe in einem 30 m hohen gemeinsamen Widerlagerblock treffen – ein Bauwerk von bestechender Originalität und Eleganz (Bild 17).



Bild 11 Dr. h. c. Heinrich E. Gruner,
1873–1947

Auch wieder Staudämme

Neben der grossen Zahl von Staumauern wurden nach dem Zweiten Weltkrieg in der Schweiz vermehrt auch wieder Dämme gebaut (Bild 15), nachdem deren Projektierung und Ausführung endlich auf eine wissenschaftliche Grundlage gestellt worden war. Bereits 1950–1954 entstand der Erddamm Castileto bei Marmorera, 39 km südlich von Chur. Mit 91 m Höhe und 2,7 Mio. m^3 Schüttvolumen übertraf er

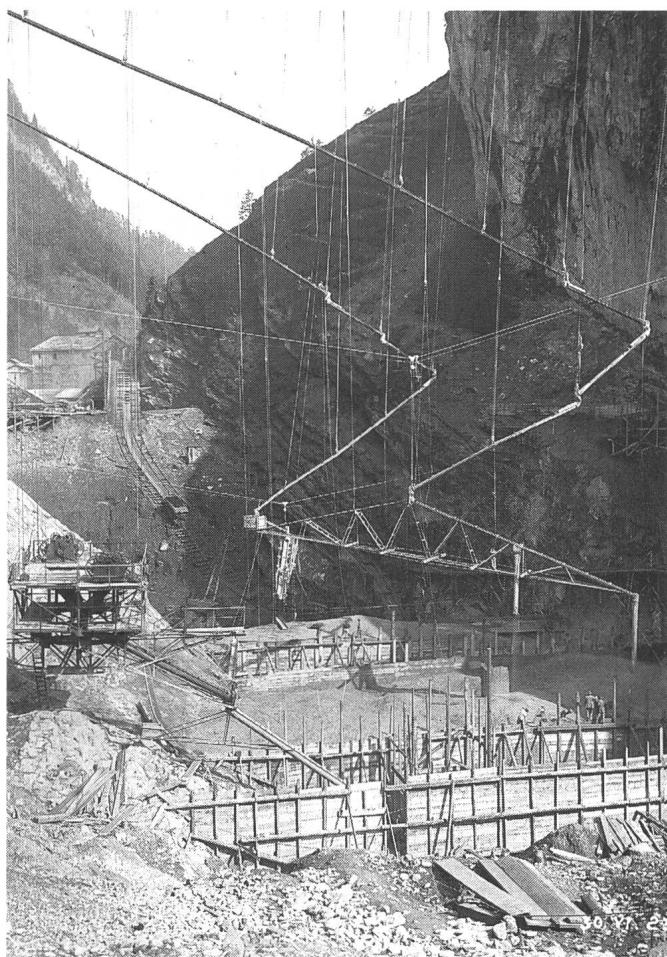


Bild 12
Betonierung 1923 der
Staumauer Schräh
mittels Giessrinnen

Foto E. Schnitter, Itschnach ZH

Andererseits kann festgehalten werden, dass bislang nur sehr wenige Unbeteiligte zu Schaden gekommen sind.

Dichtungsschirme

Unter Nebenanlagen werden hier jene Bauten verstanden, die in den meisten Fällen unter, in oder neben einer Talsperre nötig sind. Im Untergrund bildet der Schirm von Zementinjektionen die wohl wichtigste Ergänzung: Wenige Meter auseinanderliegende Bohrlöcher werden mit Zement ausgepresst, um die Wasserdurchsickerungen unter der Sperré hindurch zu minimieren. Zur Verfestigung bzw. Abdichtung von gründungsnahe Fels kamen in England und den USA schon im letzten Viertel des 19. Jahrhunderts vereinzelt Injektionen zur Anwendung [7]. Ab 1915 erstellte man in den USA eigentliche Dichtungsschirme mit grösserer Tiefe.

In der Schweiz wurden beim Bau der ersten Gussbetonmauer, Barberine, 38 km südwestlich von Sitten, von 1921 bis 1925 erstmals sowohl kurze Verfestigungs injektionen verwendet als auch ein tieferer, zweireihiger Dichtungsschirm unter dem wasserseitigen Mauerfuss gezogen. Beides wurde danach zur Standardprozedur, wobei die Tiefe der Bohrungen sowie die damit abgedeckten Schirmflächen beachtliche Ausmasse erreichten, vor allem bei kalkigem und deshalb oft natürlich ausgelagtem Untergrund. Die Schirmflächen übertrafen den vom eigentlichen

alles in Europa auf diesem Gebiet Dangewesene. Als nächster grosser Dammbau folgte 1956–1960 derjenige auf der Göscheneralp, 28 km südwestlich von Altdorf (Bild 18). Mit 155 m Höhe blieb er knapp unter dem damaligen Weltrekord (Bild 9, unten). Das Material für den schlanken Dichtungskern musste ähnlich wie Beton aus Ton und Kies gemischt werden. Der Ton kam aus Wildegg im Aargau, der Kiessand war ebenso lokalen Ursprungs wie das Bergsturz-Material für die beidseitigen Stützkörper.

Schliesslich entstand 1961–1967 noch der 120 m hohe Mattmarkdamm, 51 km südöstlich von Sitten. Die über 10 Mio. m³ umfassende Schüttung ruht auf bis zu 100 m tiefen Alluvionen, die über einen Querschnitt von 20 000 m² mit Zement- und Ton-Gel-Injektionen abgedichtet wurden. Noch während des Baus verschüttete ein Gletscherabbruch die Arbeitersiedlung unterhalb der Sperrstelle und begrub 88 Arbeiter. Es ist dies das bei weitem schwerste Unglück, das den schweizerischen Kraftwerkbau betroffen hat, doch darf man darüber nicht die vielen einzelnen

auf fast jeder Baustelle vergessen, die ihren Einsatz unter oft schwierigsten Umständen mit dem Leben bezahlten.



Bild 13 Prof. Dr. h. c. Alfred Stucky,
1892–1969



Bild 14 Dr. h. c. Henri Gicot,
1897–1982

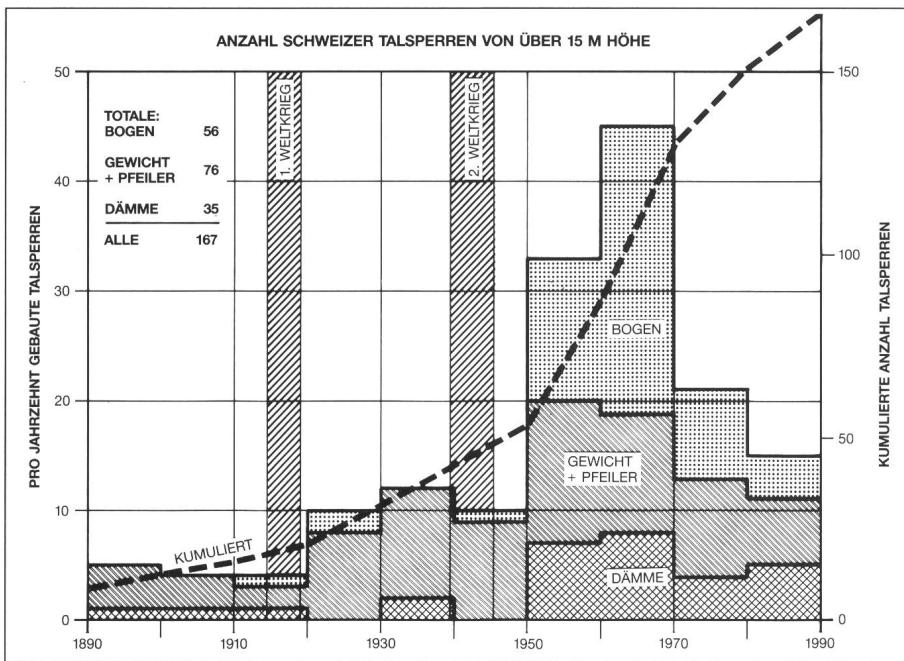


Bild 15 Entwicklung der Anzahl schweizerischer Talsperren von über 15 m Höhe und ihrer Bautypen

Bauwerk gesperrten Talquerschnitt bis zum Zwanzigfachen, wie zum Beispiel im Fall der Staumauer Limmern (Tabelle I).

Hochwasser- und Grundablässe

Weltweit gesehen eher bescheidene Ausmasse haben die Hochwasserüberläufe der Schweizer Talsperren, weil die Einzugsgebiete der gestauten Gewässer – mit drei Vierteln unter 100 km² – meist klein sind (Bild 19). Zurzeit gibt es in der Schweiz erst zwei Überläufe, die mehr als 1000 m³/s, und weitere sechs, die 500–1000 m³/s abführen (Tabelle II). Unter den grössten Anlagen befindet sich die 40 m weite, schon im 19. Jahrhundert in Fels geschnittene Ablaufrinne neben der ersten grösseren Staumauer der Schweiz bei Freiburg. Ihr Einlauf wurde 1909 mit vier Segmentschützen versehen, ein Typ, der ebenfalls ein Novum in der Schweiz war [2]. In Tabelle II fällt auf, dass in den letzten Jahren bei mehreren Überläufen die Abflussleistung erhöht werden musste, zum Teil sogar massiv. Dies ist eine Folge der – vor allem auf der Alpensüdseite markanten – Zunahme der kurzfristigen Niederschlags- und Abflussmengen sowie einer entsprechenden Verschärfung der behördlichen Vorschriften [8]. Neben den grösseren Anlagen wurden davon auch zahlreiche kleinere betroffen, bei denen die sogenannten freien, das heisst nicht mit Schützen ausgerüsteten Überläufe,

bei grosser Formenvielfalt vorherrschen.

Bei Staumauern an grösseren Flüssen wurden zur Hochwasserableitung – und zur Abspülung von Geschiebeablagерungen im Staugebiet – auch Grundablässe durch den Mauerfuss vorgesehen, zum Beispiel 1920 beim Wasserkraftwerk Mühlberg an der Aare im Kanton Bern, 1910 bzw. 1986 bei den Staumauern Nisellas und Solis an der Albula im Kanton Graubünden, 1933 beim Wasserkraftwerk Wettingen an der Limmat im Kanton Aargau, oder 1943 beim Wasserkraftwerk Verbois an der Rhone im Kanton Genf. Diese Grundablässe an Flüssen erreichten ihre grössten Dimensionen bis zum Zweiten Weltkrieg (Bild 20).

Schon zuvor wurden die Grundablässe der alpinen Speicher angesichts der Wasserdrücke, die bei der 1932 erbauten Spitalammsperre im Kanton Bern bis zu 0,9 Megapascal erreichten, mit Drosselklappen von meist bescheidenem Ableitvermögen versehen. Dies änderte sich nach den erwähnten Bombenangriffen auf deutsche Talsperren, als Militär und Behörden Grundablässe verlangten, die eine Stauentleerung binnen weniger Tage gestatten. Deshalb sind die Grundablässe der neueren Schweizer Talsperren meist reichlich bemessen und mit modernen, durch ölhdraulische Kolbenpressen betätigten Gleitschützen versehen. Sie widerstehen Drücken bis zu zwei Megapascal, zum Beispiel bei der Grande Dixence, und Wasserlasten bis zu 7 MN, wie bei der Staumauer Mauvoisin. Im internationalen Vergleich sind aber auch das eher bescheidene Zahlen [4].

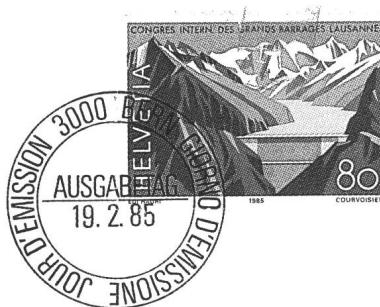


Bild 16 Aus Anlass des 1985 erstmals in der Schweiz abgehaltenen internationalen Talsperrenkongresses wurde eine Briefmarke mit der höchsten Staumauer der Welt, Grande Dixence, herausgegeben

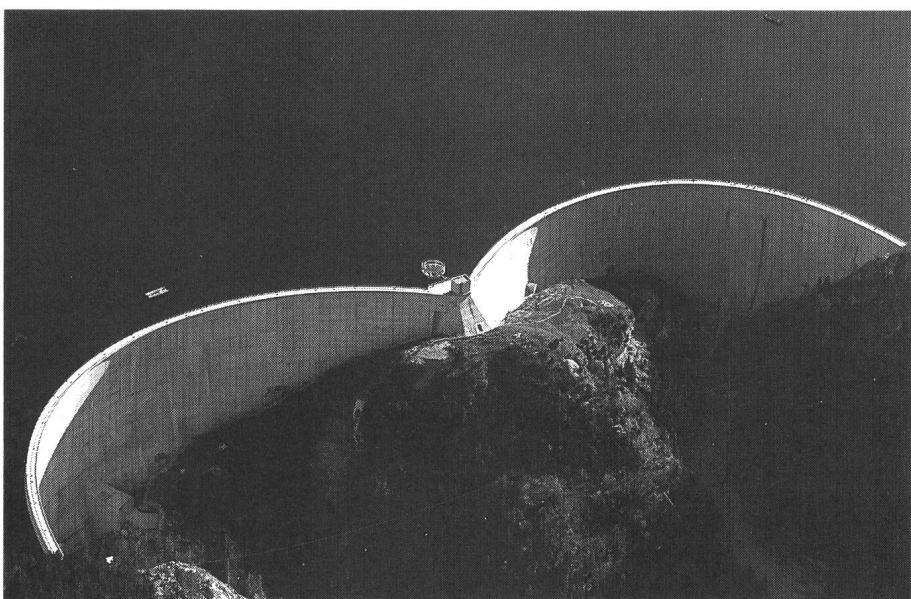


Bild 17 Luftaufnahme der Zwillingsbogenmauer Hongrin

Foto EOS, Lausanne



Bild 18 Luftseitige Ansicht des Staumannes Göscheneralp während des Baus

Foto E. Brügger, Zürich

werden müssen. Erstanwendungen dieses Prinzips gab es 1925 zwischen den Kraftwerken Klosters und Küblis in Graubünden sowie zwischen Oberems und Turtmann im Wallis. Die rund 50 zurzeit in der Schweiz in Betrieb stehenden Staubecken ausserhalb von Gewässern weisen einen Gesamtinhalt von 4,5 Mio. m³ auf. Ein gutes Drittel davon staut je 10 000–50 000 m³, ein weiteres Drittel je 50 000–100 000 m³ und das letzte Drittel über 100 000 m³. Mit 401 000 m³ Inhalt das grösste ist das 1901–1909 oberhalb von Spiez am Thunersee, Kanton Bern, erstellte Sammelbecken Spiezmoos [9].

Nur bei wenigen dieser Becken war es möglich, sie unverkleidet zu belassen oder sie lediglich mit Lehm abzudichten. In den 1920er Jahren wurden einige sogar mit Abschlüssen aus Eisenbeton versehen, wie das 47 000 m³ fassende Becken Les Marécottes, 30 km südwestlich von Sitten. Der vom bekannten Eisenbetonfachmann und EPFL-Professor Alexandre Sarrasin, 1885–1976, entworfene Abschluss besteht aus einer Vielzahl geneigter Gewölbe von je 6 m Höhe und Spannweite und ist die ein-

Staubecken ausserhalb Gewässern

Wo an einem Gewässer keine geeignete Stelle auch nur zur Tages-Wasserspeicherung vorhanden war, hob man zu Beginn dieses Jahrhunderts des öfteren und später noch gelegentlich kleine Staubecken ausserhalb der Gewässer aus, in einigen Fällen sogar unterirdisch. Der Aushub wurde in der Regel zur Schüttung von Dämmen und damit zur Erhöhung des Stauinhalts verwendet. Einige solche künstliche Speicher dienten auch als Oberbecken für die ersten kleinen Pumpspeicherwerke, beispielsweise von 1904–1960 in Ruppoldingen im Kanton Solothurn und seit 1909 in Schaffhausen. Später verwendete man sie auch als Unterbecken für saisonale Pumpspeicheranlagen, zum Beispiel 1963 in Hintersand im Kanton Glarus, 1965 in Arolla und Stafel im Wallis sowie 1973 in Les Esserts, ebenfalls im Wallis. Einige wenige Kunstspeicher haben gar den Ausgleich des Abflusses aus dem Kraftwerk zugunsten der Unterlieger zum Zweck, wie 1949 in Linthal, Glarus, 1963 erweitert, und 1958 in Liddes im Wallis.

Etwa die Hälfte aller künstlichen Becken dient jedoch dem Ausgleich der Betriebswassermengen innerhalb aufeinanderfolgender Kraftwerkstufen, so dass diese nicht strikt im Takt betrieben

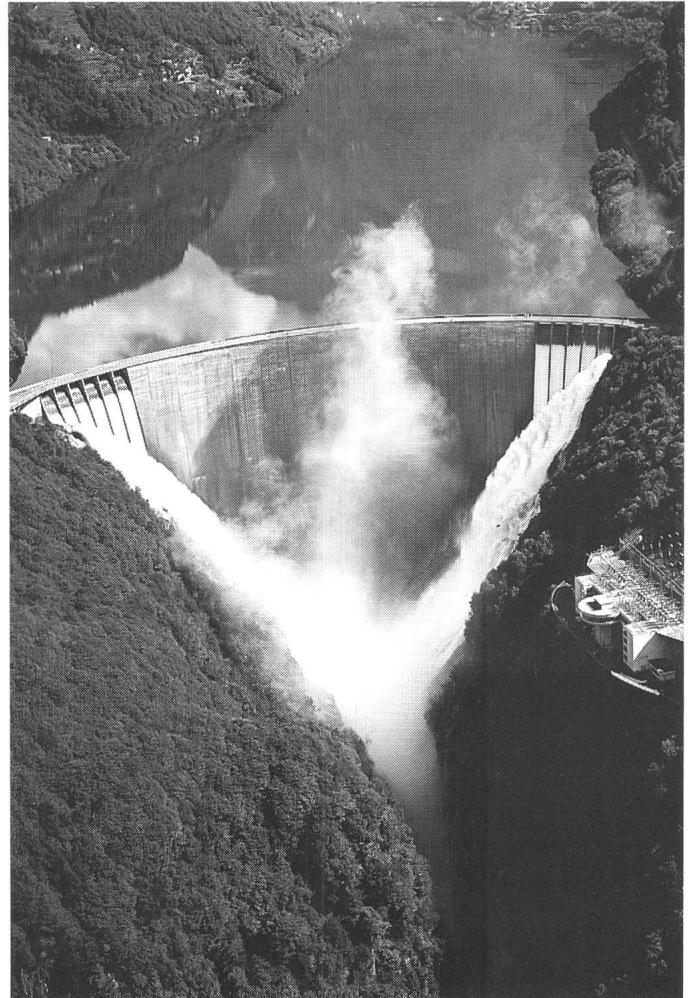


Bild 19
Hochwasserüberläufe
der 220 m hohen
Bogenstaumauer
Contra im Tessin in
Betrieb
Foto Verzasca SA, Lugano

zige Staumauer dieser Art in der Schweiz [10].

Wohl durch erste, in den 1930er Jahren erfolgte Anwendungen an Talsperren in Deutschland und im damals noch französischen Algerien angeregt, kam dann 1939 erstmals in der Schweiz Bitumen zur Anwendung, und zwar als 6 cm starke Schicht auf den Innenböschungen des 90 000 m³ grossen Beckens bei Rodi Fiesso, 40 km nordwestlich von Bellinzona (Bild 21). Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden Bitumenverkleidungen auch der Sohle die vorherrschende Art der Abdichtung von Staubecken ausserhalb von Gewässern in der Schweiz. Sie bewährten sich gut, abgesehen von Ablösungen beim zweilagigen Einbau der Bitumendecken, wie er von 1955 bis 1965 üblich war.

Nutzung von Naturseen

Natürliche Seen als Speicher heranzuziehen ist naheliegend und verlockend, doch muss der See dazu in einiger

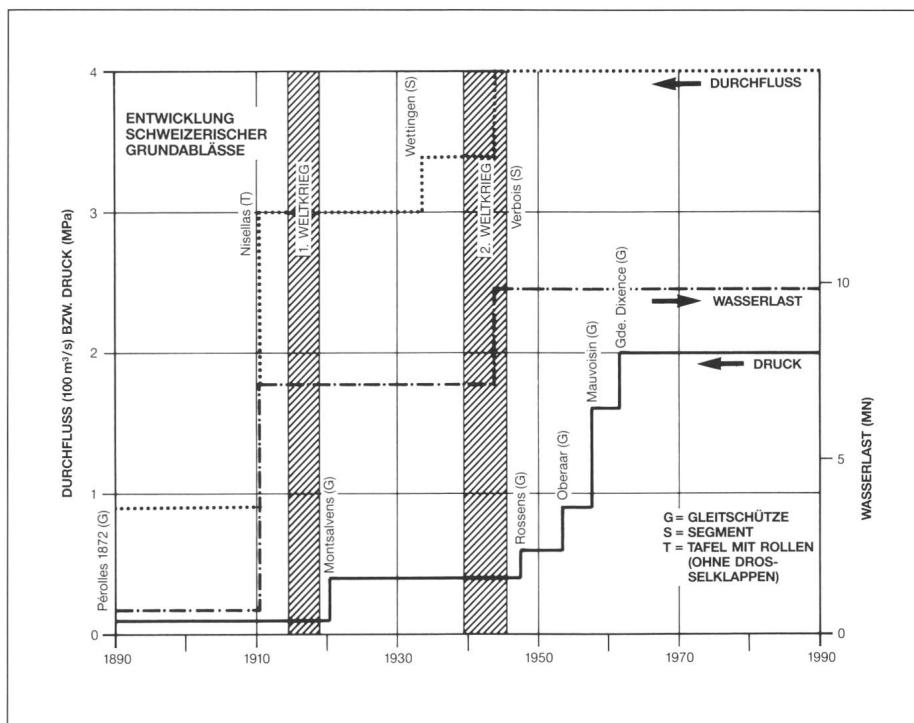


Bild 20 Entwicklung schweizerischer Grundablässe

Talsperre							Injektionsschleier
Betriebs-aufnahme (-ende)	Name/Kanton	Typ	Höhe (m)	Fläche (10 ³ m ²)	Max. Tiefe (m)	Fläche (10 ³ m ²)	Verhältnis Schleierfläche zu Sperrenfläche
1925(-74)	Barberine/VS	Gewicht	79	10	25	5	0,5
1932	Spitallamm/BE	Bogen	114	16	40	9	0,6
1957	Mauvoisin/VS	Bogen	237	63	220	247	3,9
1961	Grande Dixence/VS	Gewicht	285	100	180	180	1,8
1961	Göscheneralp/UR	Damm	155	43	115	146	3,4
1963	Luzzone/TI	Bogen	208	59	115	106	1,8
1965	Limmern/GL	Bogen	146	27	300*	545	20,2
1968	Hongrin/VD	2 Bogen	125/98	38	190*	130	3,4
1968	Punt del Gall/GR	Bogen	130	38	160	180	3,4

* In Stauseeuf er

Tabelle enthält alle Schirme von über 100 000 m² Fläche

Tabelle I Bemerkenswerte Injektionsschirme unter Schweizer Talsperren

Tiefe unter dem Seespiegel angezapft werden, eventuell muss man ihn sogar aufstauen. Neben der Gefahr von Uferutschungen bei der Spiegelabsenkung ist die Anzapfung selbst oft ein heikles Unterfangen. Wohl deshalb sind solche Techniken in der Schweiz, trotz ihres Reichtums an Seen, eher selten geblieben. An den Seen des Mittellandes waren ohnehin nur geringe Absenkungen oder Aufstauungen möglich, und sie wurden meist im Zusammenhang mit Seeregulierungen zum Hochwasserschutz vorgenommen. Die geringen Fallhöhen erlaubten nur bescheidene Wasserkraftnutzungen. Im Gebirge wurden wohl zahlreiche Naturseen

überstaut, aber nur wenige zusätzlich noch abgesenkt.

Eines der wenigen Beispiele ist die Absenkung des Lungernsees, 30 km südlich von Luzern, im Jahre 1836 um 36 m, zur Gewinnung von landwirtschaftlich nutzbarem Boden. Der Anstichstollen wurde mit einer Gross sprengung mit dem See verbunden. Den Wasserabfluss kontrollierte man mit einem hölzernen Tafelschütz am unteren Ende des Stollens, wogegen bei späteren ähnlichen Anlagen die Regulierorgane meist in einem lotrechten Schacht am Seeufer angeordnet wurden. Zudem nahm man neuere Seeabsenkungen wenn immer möglich mittels Kanälen, Heberleitungen oder Pumpen vor, denn Seeanstiche haben

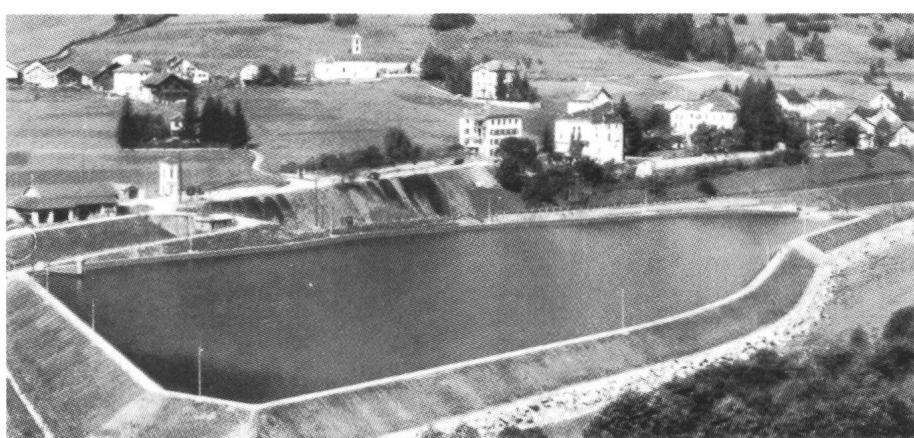


Bild 21 Im Jahr 1939 als erstes mit Bitumen verkleidetes Ausgleichsbecken bei Rodi Fiesso im Tessin

Foto Walo Bertschinger AG, Zürich

Geschichte der Wasserkraft

Talsperre			Überlauf		
Betriebs-aufnahme (-ende)	Name/Kanton	Typ	Höhe (m)	Leistung (m³/s)	Anzahl und Typ der Schützen
1872 (1909)	Pérolles/FR	Gewicht	21 (24)	90 (500)	keine (4 Segmente)
1910 (1986)	Nisellas/GR (Solis/GR)	Gewicht (Bogen)	19 (61)	350 (500)	1 Tafel (+ 2 Saugheber) (1 Klappe + freier Überfall)
1920	Mühleberg/BE	Gewicht	29	550	8 Tafeln + 2 Klappen
1943	Verbois/GE	Gewicht	34	800	4 Klappen
1951 (1984)	Molina/GR	Gewicht	52 (55)	400 (600)	keine (keine)
1952 (1980)	Palagnedra/TI	Bogen	72	450 (2200)	keine (keine)
1962	Sufers/GR	Bogen	58	600	3 Klappen
1965 (1990)	Contra/TI	Bogen	220	1000 (1800)	keine (keine)

Tabelle II Bemerkenswerte Schweizer Hochwasserüberläufe
(Rekorde zur Zeit der Erstellung sind fett)

sich auch mit modernen Mitteln oft als schwierig erwiesen (Tabelle III).

Höchst gefährlich wurden die Arbeiten, wenn der Durchbruch zum Seeboden nicht wie am Lungernsee auf Anhieb gelang, oder wenn nachrutschende Seeablagerungen ihn wieder verstopften (Bild 22). Besonders dramatisch verlief in dieser Beziehung die Absenkung des Arnensees, 65 km südlich von Bern, um 25 m [11]: Nachdem zwischen 1913 und 1919 von einem südwestlichen Nachbartal aus ein 4,6 km (!) langer Anstichstollen mit zwei Schächten am Seeufer erstellt worden war, führten zahlreiche, auch in Parallelästen zum Stollen vorgenommene Sprengungen, zu keinem bleibenden Durchbruch. Schliesslich musste man zu Pumpen sowie Heberleitungen greifen und erst 1921 war das Werk vollendet. 1942 und 1957 wurde der See zusätzlich aufgestaut.

Drucklose Wasserfassungen

Das von den Wehren aufgestaute Wasser wurde anfänglich meist in einem Kanal, seltener durch einen Stollen, dem Maschinenshaus zugeleitet, das ausserhalb des Flusses oder an seinem Ufer gelegen war. Allerdings stand das Maschinenshaus des 1896 in Betrieb genommenen 17-MW-Kraftwerks Chèvres bei Genf bereits neben dem Wehr, wenn auch schräg zum Unterwasser verlaufend und mit einer Zulaufbucht

an seiner Rückseite. Erstmals in einer Linie quer über den Fluss angeordnet wurden Wehr und Maschinenshaus beim 83-MW-Kraftwerk Laufenburg, eine Anordnung, die danach die häufigste wurde [1]. Tabelle IV verdeutlicht, wie die Betriebswassermenge der Kanalkraftwerke immer mehr zunahm.

Ein Hauptproblem bei solchen Fassungen, ebenso bei den Turbineneinläufen in den unmittelbar neben dem Wehr angeordneten Maschinenhäusern, bil-

det die Fernhaltung des Holzes und übrigen Geschwemmsels, das vor allem bei Hochwasser oft in grossen Mengen vom Gewässer mitgeführt wird. Was nicht mit zweckentsprechender Strömungsführung durch das Wehr abgeleitet werden kann, wird von steilstehenden Rechen abgefangen. Zur Rechenreinigung wurde erstmals im Jahre 1910 am Rhonekraftwerk Chèvres eine verschiebbare Maschine installiert, deren waagrechte Harke zwischen die Rechenstäbe griff und das Geschwemmsel aus dem Wasser zog [2]. Ab 1925 lagerte man es direkt in eine Rinne ab, durch die es ins Gewässer unterhalb des Kraftwerks zurückgespült wurde [12]. Das blieb viele Jahre Standardprozedur bei allen schweizerischen Flusskraftwerken. In neuerer Zeit muss das Rechengut jedoch auf einer Kehrichtdeponie, in einer Kehrichtverbrennungsanlage oder durch Kompostierung entsorgt werden.

Oft ist die für die Geschwemmselabwehr günstigste Strömungsführung für die Fernhaltung von Geschiebe ungünstig. Bei Anordnung der Wasserfassung am äusseren Rand einer Flusskrümmung zum Beispiel treibt zwar die krümmungsbedingte Drallbewegung das Geschwemmsel nach aussen zur Fassung, zugleich aber das Geschiebe zum gegenüberliegenden Innenrand. Dieser Umstand ist eine der Grunderkenntnisse aus den Ende des 19. Jahrhunderts aufgekommenen Versuchen an hydraulischen Modellen, wie sie in der Schweiz 1928 an der EPFL unter Leitung Stuckys und 1930 an der ETHZ

Name/Kanton	Absenkung (Stollen)			Aufstau (Talsperre)		
	Jahr	Tiefe ¹ (m)	Inhalt (Mio. m³)	Jahr	Höhe (m)	Inhalt (Mio. m³)
Lungern/OW	1863	36	50	–	–	–
Tanay/VS	1902	26	3	–	–	–
Klöntal/GL	1909	7	7	1910	16	37
				1920	7	8
Ritom/TI	1917	27	20	1952	22	28
Tremorgio/TI	1918	26	7	1927	4	2
				1942	2	
Arnen/BE	1921	25	6	1957	10	4
Lucendro/TI	1944	22	3	1947	60	22
Mutt/GL	1963	29	6	–	–	–
Sfundau/TI	1968	30	1	1968	26 ²	3
Naret/TI	1970	17	3	1970	72	28

¹ Auf Betriebssenziel ohne einige Meter Mehrtiefe während Bau

² Mittels Abdichtung eines Felsriegels, d.h. ohne Talsperre

Tabelle III Anstiche von Naturseen in der Schweiz

auf Initiative von Prof. Dr. h. c. Eugen Meyer-Peter, 1883–1969, aufgenommen wurden (Bild 23).

Neben der Störung der Geschwemm selabfuhr und des Geschiebetriebes, behindern Stauhaltungen aber auch die Transporte auf den Gewässern und die Wanderung gewisser Fischarten zu ihren Laichplätzen und zurück, wie zum Beispiel Aale, Agoni, Alets, Barben, Lachse, Nasen und Seeforellen. Den flussaufwärts gerichteten Fischwanderungen versuchte man meist mit einer Serie kleiner, durchflossener Becken entgegenzukommen. Die erste solche «Fischtreppe» in der Schweiz entstand 1879 beim Kraftwerk in der Mageren Au bei Freiburg und überwand insgesamt 10 m Höhe [13]. Obschon sie recht

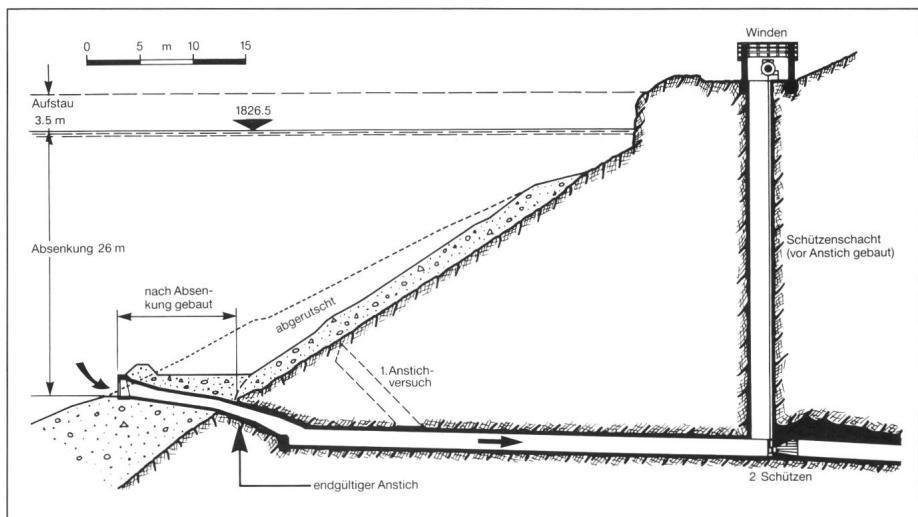


Bild 22 Anstich des natürlichen Tremorgio-Sees im Tessin 1918

Betriebs- aufnahme	Kraftwerk (Name/Kanton)	Leistung (MW)	Fluß	Entnahme (m³/s)
1878–91	Matte II und I/BE	1,2	Aare	42
1896	Ruppoldingen/SO	2,2/6,6	Aare	150/210
1898	Rheinfelden/AG	12/ 28	Rhein	560/620
1933	Albbrück-Dogern/AG	66/ 76	Rhein	900/1100

N.B.: Ursprünglicher Ausbau/Endausbau

Tabelle IV Zunahme der mittels Kanälen gefassten Betriebwassermengen in der Schweiz

erfolgreich gewesen sein soll, wurde sie zugunsten einer jährlichen Aussetzung von gezüchteten Jungfischen oberhalb der Sperre aufgegeben. Ein solches Vorgehen drängte sich von Anfang an auf bei allen höheren Stauhaltungen, wie namentlich den Talsperren. Für die Flussabwärtswanderung der Fische genügt meist der Wasserüberfall über die Wehre und selbst den Durchgang durch Francis- oder Kaplan-turbinen überleben erstaunlich viele Fische. Bezuglich der Transporte auf den Flüssen wurden bis zum Ersten Weltkrieg zahlreiche Wehre mit «Flossgassen» ausgerüstet, für die damals noch wichtige Holzflößerei. Für kleinere Boote wurden meist «Kahnrampen» erstellt für ihren Landtransport zwischen Ober- und Unterwasser. Für grössere Schiffe wurden Schleusen gebaut.

mögen über 20 m^3 in der Sekunde wurden noch mehr als doppelt so viele mit $10\text{--}19 \text{ m}^3$ und unzählige mit kleinerem Ableitvermögen gebaut. Denn zur Füllung der – vor allem nach dem Zweiten Weltkrieg erstellten – grossen Staueseen in den Alpen musste Wasser aus den Nachbartälern oder gar noch von weiter her zugeleitet werden, zur Grande Dixence aus mehr als 30 km Luftlinie!

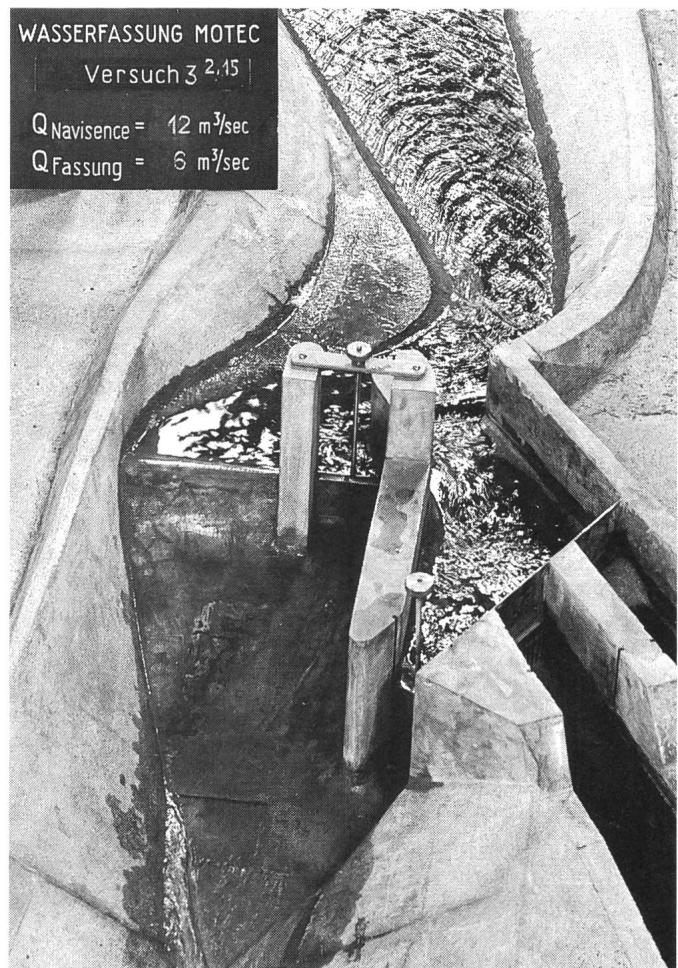


Bild 23
Modell der Wasser- fassung Motec an der Navisence im Wallis für maximal $12 \text{ m}^3/\text{s}$; man beachte die künstlich erzeugte Kurvenwirkung
Foto Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH Zürich

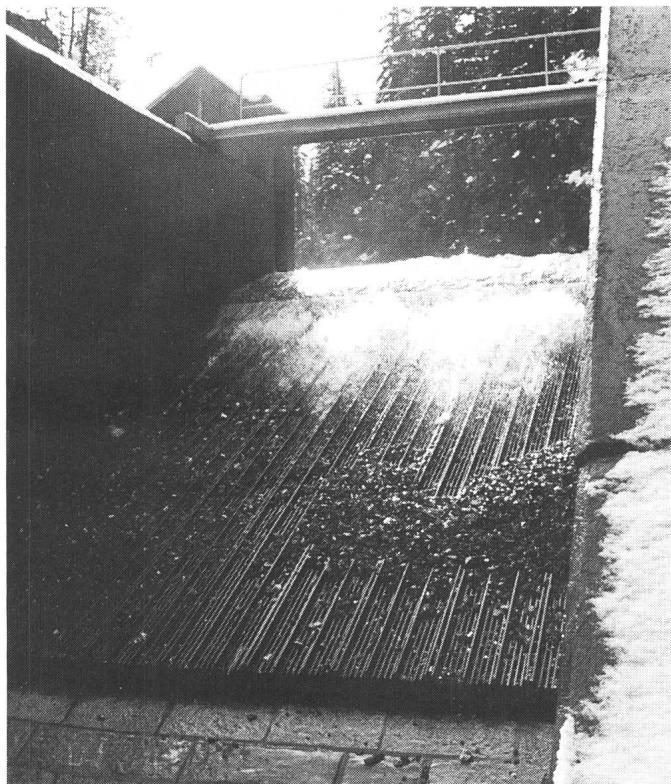


Bild 24
Grundrechenfassung
Varusch bei S-chanf im Engadin für 5 m³/s
Foto G.A. Töndury, Samedan

System um. Dieses verwendet lange Absetzkammern von dreieckigem Querschnitt, an deren Boden, der Dreieckspitze, der Sand durch viele kleine Klappen laufend abgesaugt wird [12].

Im Gegensatz dazu beruht die vom Schweizer Wasserbauer Dr. h. c. Jakob Büchi, 1879–1960, ebenfalls aufgrund von Modellversuchen im Jahre 1917 entwickelte Konstruktion auf der «Abschöpfung» des sauberen Oberflächenwassers und auf einer periodischen Abspülung des am Kammerboden abgelagerten Sandes. Beide Entsandungssysteme sind, mit Abwandlungen und Automatisierung, im schweizerischen Kraftwerkbau die meistverwendeten geblieben (Bild 25).

Wasserfassungen unter Druck

Im Vergleich zu drucklosen Wasserfassungen erscheinen solche unter Druck, das heißt in der Tiefe von Stauseen, unproblematisch. Diese Seen liegen oft so hoch im Gebirge, dass nur wenig Geschiebe anfällt und meist im «Totraum» Platz findet, der unter der Fassungshöhe ausgespart wird. Nur bei wenigen Gebirgsspeichern musste eine Spülung durch den Grundablass vorgenommen werden, zum Beispiel 1964 bei Z'Mutt, 1967 bei Gebidem und 1975 bei Ferden, alle im Wallis. Kleinere Staubecken wurden gelegentlich auch mit Stollen versehen, die geschiebeführende Hochwasser um das Becken herumleiten – erstmals angewandt 1921 am Pfaffensprung im Kanton Uri. Auch Geschwemmsel fällt im Hochgebirge selten in so grossen Mengen an, als dass die Fassungen mit einem Rechen oder

Betriebsaufnahme	Kraftwerk (Name/Kanton)	Leistung (MW)	Fluss	Entnahme (m ³ /s)
1902/19 ¹	Hauterive/FR	8/12	Saane	20
1911	Chippis/VS	38	Rhone	60
1931 ²	Piottino/TI	63	Tessin	24
1943	Mörel/VS	43	Rhone	22
1950	Lavey/VS	74	Rhone	200
1963	Simmenfluß/BE	9	Simme	22
1971	Pradella/GR	288	Inn	32

¹ 1948 im Stausee von Rossens untergegangen

² 1978 flussaufwärts verlegt

Tabelle V Grösste Wasserfassungen an schweizerischen Gebirgsflüssen

Ab den 1950er Jahren wurden bei kleineren Wasserfassungen vorwiegend geneigte Rechen im Bett des Gewässers eingelassen (Bild 24). Bei solchen Wasserentnahmen nach unten, aber auch bei gut konzipierten seitlichen Wasserfassungen, lässt sich der Eintritt von Feinkies und besonders von Sand nicht immer vermeiden. Da sandhaltiges Wasser, vor allem unter hohem Druck, sehr abrasiv auf Turbinen wirkt, muss der Sand ausgefällt werden, wenn das gefasste Wasser keinen Stausee speist, sondern direkt das Kraftwerk. Als eine der ersten Wasserfassungen wurde 1909 jene des Kraftwerkes Ackersand I im Wallis mit einer Entsandungsanlage versehen. Anlässlich einer 1917 vorgenommenen Erweiterung baute man sie auf das 1911 vom Schweizer Ingenieur Henri Dufour, 1877–1966, patentierte

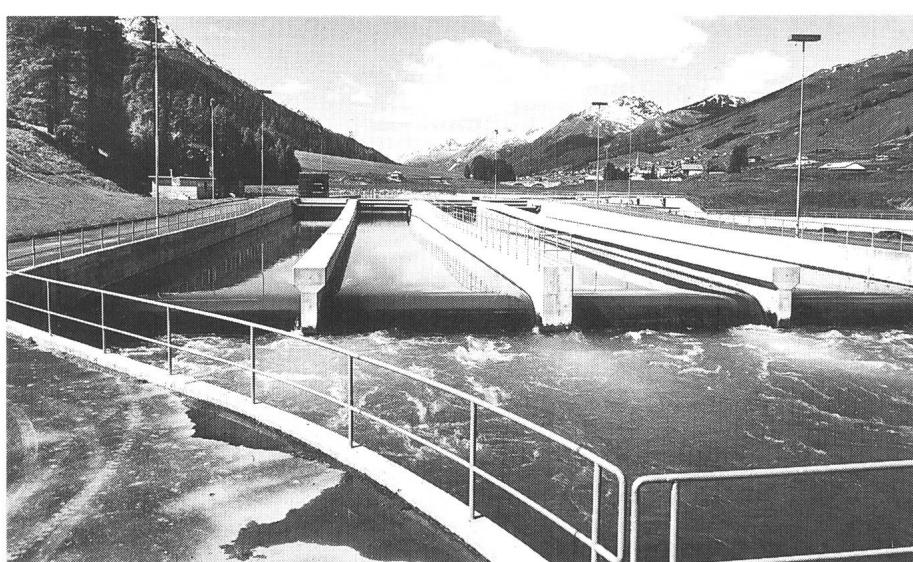


Bild 25 Unterwasserseitige Ansicht der vier Entsandungsbecken für je 8 m³/s Durchfluss bei der Innfassung für die Kraftwerke Pradella im Engadin
Foto J. Feuerstein, Scuol

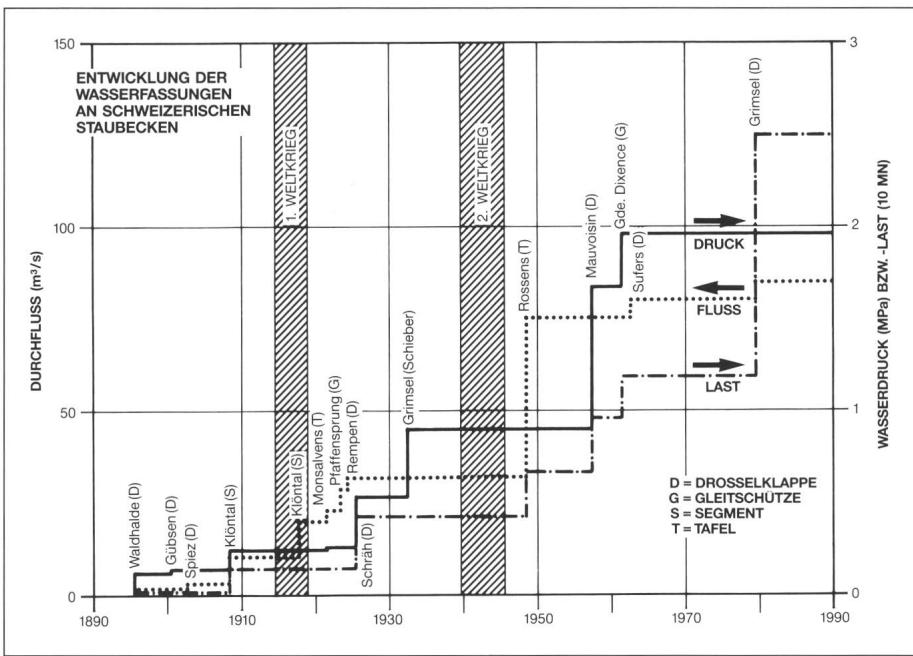


Bild 26 Entwicklung der Wasserfassungen an schweizerischen Staubecken

gar einer Rechenreinigungsmaschine ausgerüstet werden müssten.

Nach den eigentlichen, meist leicht trompetenförmigen Einläufen, sind als Abschluss von Anfang an bis heute vorzugsweise Drosselklappen eingebaut worden, weil es ja nur um einen Totalabschluss geht und nicht um eine Durchflussregulierung (die besorgen die Leitapparate bzw. Düsen an den Turbinen). Vereinzelt kamen auch Tafel- oder Segmentschützen zum Einsatz. Wie Bild 26 zeigt, stieg entsprechend der zunehmenden Talsperrenhöhe auch der Druck auf diese Abschlussorgane kontinuierlich an, von gut 0,1 Megapascal bei der 1895 errichteten Fassung Waldhalde im Kanton Zürich

auf fast zwei Megapascal bei der 1961 fertiggestellten Grand Dixence. Im Verein mit dem gleichzeitig gesteigerten Durchfluss bzw. Querschnitt pro Öffnung nahm die Wasserlast auf die Abschlüsse überproportional zu und erreichte 1979 beim Umwälzwerk Grimsel II an der unterwasserseitigen Drosselklappe von 4,6 m Durchmesser 25 MN, etwa die Hälfte des heutigen Welt höchswerts.

Kanäle als Triebwasserleitungen

Welche Kanäle von mehr als einem Kilometer Gesamtlänge angelegt wurden, um das Betriebswasser zum Maschinenhaus zu leiten bzw. es von ihm abzuleiten, zeigt Tabelle VI. Während die Ableitungen unverkleidet blieben, wurden die Zuleitungen meist durch Betonplatten abgedichtet. Diese vermindern zudem den Fallhöhenverlust infol-

Betriebs-aufnahme (-ende)	Kraftwerk (Name/Kanton)	Länge (km)	Quer-Schnitt (m ²)	Durch-fluß (m ³ /s)	Verkleidung
1892 (–1952)	Brugg/AG	1,0 ¹	15	20	Beton
1894	Aarau I/AG	2,2	35	30	Beton ²
1898	Rheinfelden/AG	1,0	240	560	Mauerwerk
1901 (–1948)	Bois Noir/VS	4,0 ¹	24	40	Pflästerung
1902	Beznau/AG	1,2	260	300	Pflästerung ²
1904 (–1970)	Wangen an der Aare/BE	8,3	100	120	Beton
1912	Aarau II/AG	2,2	180	180	Beton ²
1917	Olten-Gösgen/SO	6,2 ¹	210	350	Beton ^{2,3}
1933	Albbrück-Dogern/AG	3,5	550	900	Beton
1945	Rupperswil-Auenstein/AG	2,5 ¹	290	350	keine
1952	Wildeggs-Brugg/AG	4,5 ¹	320	350	Beton ³

¹ Zu- und Ableitung ² nur Böschungen ³ nur Zuleitung

Tabelle VI Die Schweizer Kraftwerkskanäle von über 1 km Länge

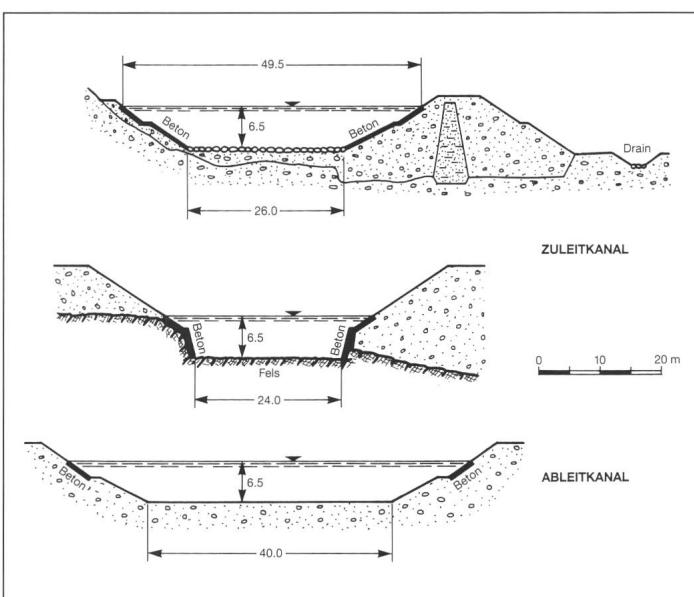


Bild 27
Typische Quer-schnitte der Zu-(oben und Mitte) und Ableitkanäle (unten) des 1917 fertiggestellten Aarekraftwerkes Olten-Gösgen

ge Reibung. In der Regel liess es das Gelände nicht zu, die Kanäle einfach darin auszuheben, vielmehr mussten sie streckenweise zumindest auf einer Seite durch Dämme abgeschlossen werden (Bild 27 [34]).

Ganz in Fels ausgebrochen wurde in den Jahren 1895–1898 der Kanal des Kraftwerkes Rheinfelden, wobei man das Aushubmaterial noch ausschliesslich mit Schubkarren abtransportierte! Schon wenige Jahre später erfolgte dies beim Kanal des Aarekraftwerkes Beznau, der fast ganz aus Kiessand gegraben wurde, mit provisorisch verlegten Schmalspurbahnen, in denen kleine Dampflokomotiven und seitlich kippbare Wagen verkehrten [14]. Den Aushub der 0,5 Mio. m³ besorgten dampfbetriebene Bagger. Diese Methode blieb bis nach dem Zweiten Weltkrieg

Geschichte der Wasserkraft

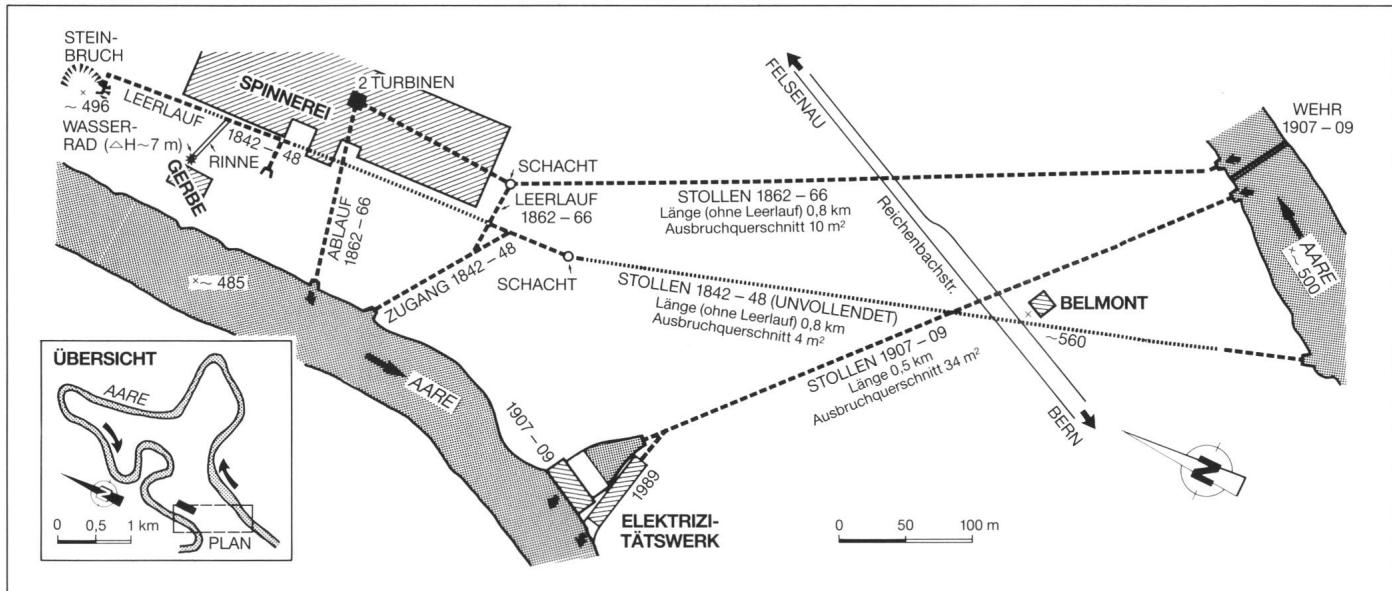


Bild 28 Stollensystem unter der Felsenau in Bern (nach alten Plänen von Gewerbepark Felsenau und Gugelmann AG, Roggwil)

in Gebrauch, als – aus den USA kommend – grosse Pneufahrzeuge eingeführt wurden, die nach dem Beladen mit Baggern ihre Last nach hinten abkippen oder durch den Boden entleeren konnten. Rasch kamen Fahrzeuge auf, die den Boden aufschürfen.

Beim Bau der Zu- und Ableitkanäle des Aarekraftwerkes Wildegg-Brugg im Aargau von 1949 bis 1952 kamen noch beide Methoden zum Einsatz, indem man für Transporte von unter vier Kilometern Entfernung Pneufahrzeuge

und darüber Schmalspurbahnen einsetzte [3]. Insgesamt wurden hier über 2,3 Mio. m³ ausgehoben und davon 1,1 Mio. m³ in die Kanaldämme eingebaut. Zusätzlich gingen mehr als 0,6 Mio. m³ in die insgesamt 7 km langen Dämme entlang beider Flussufer im Staugebiet oberhalb des Wehres. Solche Dämme im Staugebiet mussten auch an mehreren Stauhaltungen von reinen Flusskraftwerken aufgeschüttet werden, zum Teil begleitet von einer Vertiefung des Flussbettes unterhalb der Anlage.

Triebwasserstollen

In einem so gebirgigen Land wie der Schweiz lag es nahe, Triebwasserleitungen unterirdisch zu führen. Oft zwangen schon die Verhältnisse dazu. Außerdem verfügten die schweizerischen Baufachleute vom Eisenbahnbau her, der dem Kraftwerkbau vorausgegangen war, über reiche Erfahrung im Bau von Tunnels, zum Beispiel dem 15 km langen Gotthardtunnel von 1872 bis 1882. Ein wesentlicher Unterschied gegenüber Eisenbahntunnels lag allerdings im viel kleineren Querschnitt der Wasserstollen. Er machte den Einsatz der Maschinen, die für den Tunnelbau zum Bohren der Löcher für die Sprengladungen entwickelt worden waren, unmöglich, so dass man auf die althergebrachte Handbohrmethode mit Bohrstange und Hammer zurückgreifen musste. Knapp 10 m² Querschnitt hatte zum Beispiel der wohl älteste Kraftwerkstollen der Schweiz, der zwei Kilometer nördlich von Bern eine Aareschleife abschnitt, um unter der Spinnerei – dem heutigen Gewerbepark – Felsenau Turbinen anzutreiben (Bild 28 [15]). Dieses 1862–1866 erstellte, rund 960 m lange Stollensystem benutzte Teile eines schon 1842 in Angriff genommenen, aber unvollendet gebliebenen Durchstichs. Das Wasser floss darin mit freiem Spiegel, also drucklos. 1909 wurde es durch den weiter südwestlich verlaufenden Stollen des – 1989 erneuerten – Elektrizitätswerkes Felsenau ersetzt.

Auch in den ersten, am Ende des letzten und am Beginn dieses Jahrhunderts angelegten, langen Triebwasserstollen lief das Wasser ohne Druck, doch

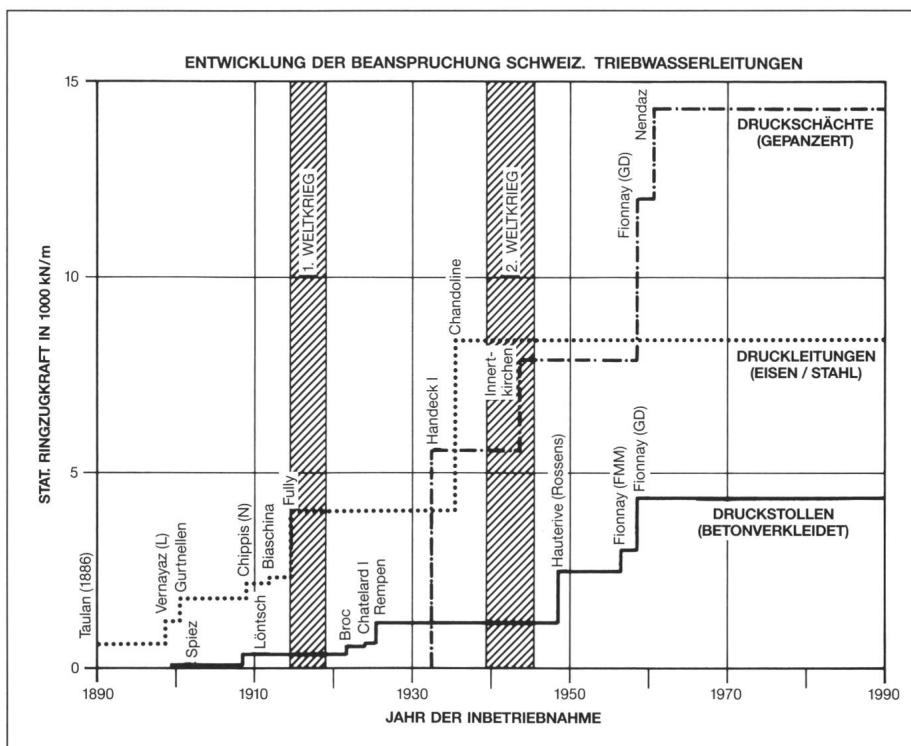
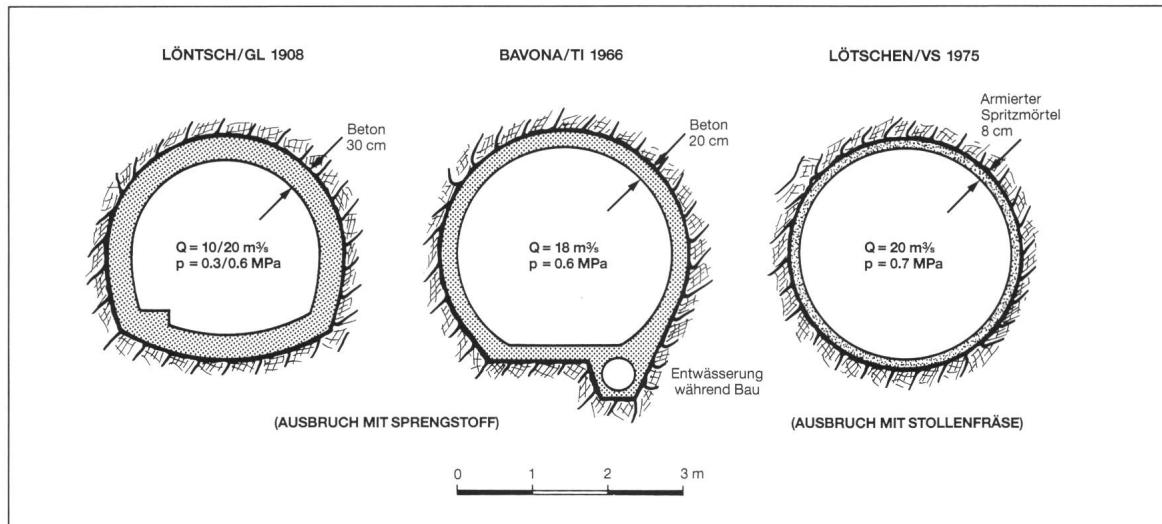


Bild 29 Entwicklung der Beanspruchung in schweizerischen Triebwasserleitungen

Bild 30
Querschnitte des Druckstollens des Lötschwerkes (links) und zweier moderner Stollen unter ähnlichen Gegebenheiten



wagte man zum Teil schon längere Strecken zwischen den Angriffspunkten (Tabelle VII). Mit der Handbohrmethode kam man in der Urnäschzuleitung zum Kraftwerk Kubel auf 1,35 m mittlere Ausbruchsleistung im Tag [16] und im Triebwasserstollen des Lötschwerkes, knapp nördlich von Glarus, auf 1,05 m [17]. In letzterem Stollen wurden aber auch schon druckluftbetriebene Handbohrhämmereingesetzt, die eine Steigerung der mittleren Ausbruchsleistung auf 4,5 m im Tag erlaubten.

Besonders bemerkenswert ist der Lötschstollen jedoch, weil – abgesehen vom 1899 vollendeten, kurzen und schwach eingestaunten Stollen des Kraftwerkes Spiez am Thunersee [9] – darin das Wasser erstmals unter erheblichem Druck lief, nämlich bis zu 0,34 Mega-

pascal (Bild 29). Um allfällige, vom Druck verursachte Wasserverluste in den umgebenden Fels zu minimieren, wurde dieser auf der ganzen Stollenlänge mit einer mindestens 30 cm dicken Betonverkleidung versehen. Da sich dadurch auch die Fallhöhenverluste infolge Reibung verminderten, konnte man den Ausbruchsquerschnitt entsprechend kleiner halten. In Anlehnung an die drucklosen Triebwasserleitungen wurde noch ein hufeisenförmiger Querschnitt gewählt, bei dem Wände und Boden in der unteren Stollenhälfte viel weniger gekrümmmt sind als in der oberen (Bild 30). Prompt zeigten sich nach der Inbetriebnahme Risse in der Verkleidung, wie sie auch in anderen ähnlich konstruierten Stollen auftraten.

Übrigens konnte die als Druckstollen konzipierte Triebwasserleitung des Kraftwerks Obermatt, das 1905 bei Engelberg im Kanton Obwalden erstellt worden war, nie unter Druck betrieben werden. 1962 wurde sie daher durch eine Neuanlage ersetzt [18]. Die – gleich dem Lötschstollen – 1908 in Betrieb genommenen unteren 2,6 km des Triebwasserstollens zum Walliser Kraftwerk Martigny-Bourg hingegen stehen, obschon nicht verkleidet, sogar unter 0,49 Megapascal Druck – ein Wagnis, das in der Schweiz selten Nachahmung gefunden hat.

Steigender Wasserdruk

Durch den Schaden im Lötschstollen klug geworden, führte der verantwortliche Konstrukteur Carl Brodowski, 1869–1937, Bauchef der Motor AG, (heute Motor-Columbus AG) im aargauischen Baden, den kreisförmigen Querschnitt ein, und zwar beim kurzen, aber unter 1,47 Megapascal Druck stehenden Übergangsstück von dem Triebwasserstollen zur Druckleitung des 1911 vollendeten Tessinkraftwerkes Biaschina, 22 km nordwestlich von Bellinzona [19]. Der kreisförmige Querschnitt wurde danach für die meisten Druckstollen üblich (Bild 30). Die dem Wasserdruk entgegenwirkende Zugkraft, die man dem Betonring und dem umgebenden Fels zumutete, stieg zwischen den beiden Weltkriegen von 420 kN pro m Länge im Lötschstollen auf rund 1200 kN pro m Länge (Bild 29). Auf nochmals mehr als den doppelten Wert erhöhte man diese Kennzahl bereits 1948 bei der Erneuerung des Saanekraftwerkes Hauterive, südlich von Freiburg. Diese Anlage wurde unter der Projektleitung des Walliser Bau-

Betriebsaufnahme (-ende)	Kraftwerk (Name/Kanton)	Innen-druck (MPa)	Länge (km) zwischen		Ausbruchs-Querschnitt (m^2)
			Total	Angriffen ²	
1895	Waldhalde/ZH	0	2,2	1,1	4
1895 (–1975)	Zufikon/AG	wenig	0,4	0,4	20
1896	Clées/VD	0	3,5	–	4
1900	Kubel/SG (Urnäschzuleitung)	0	4,3	1,5	4
1902 (–1948)	Hauterive/FR	0	9,2	<1,0	18
1908	Lötsch/GL	0,34	4,1	2,6	7
1909	Ackersand I/VS	0	10,7	<0,5	3
1909	Felsenau/BE	wenig	0,5	0,5	34
1921	Arnenseeanstich/BE, VD	0,44	4,6	4,5	6
1931	Lungern/OW (Melchaazuleitung)	0	6,5	6,5	6
1935	Chandoline/VS	0,88	11,9	3,5	6
1950	Lavey/VD	0,29	2,8	3,2	60
1953	Verbano/TI (Bavonzuleitung)	0	23,4	9,6	20
1955	Rheinau/ZH (Ableitstollen)	0	2 x 0,3	0,3	2 x 120
1956	Riddes/VS	0,82	14,7	10,4	12
1971	Pradella/GR	1,19	20,3	11,1	27

¹ Am Stollenende ² Inklusive Zugangsstollen

Tabelle VII Bemerkenswerte Schweizer Wasserstollen (Rekorde fett)

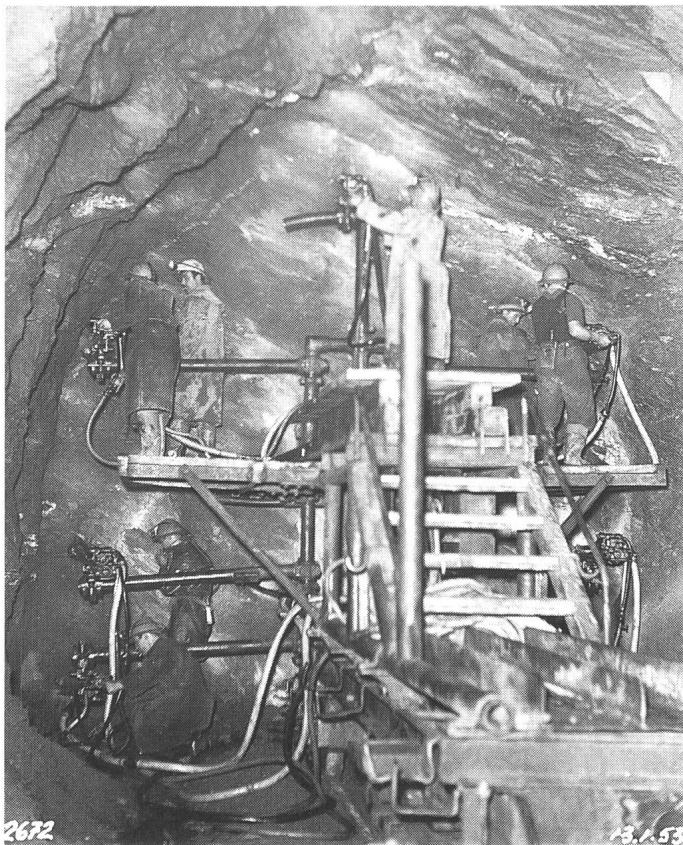


Bild 31
Mechanisierung des
Stollenbaus nach
dem Zweiten Welt-
krieg mittels Bohr-
wagen

Foto Maggia SA, Locarno

durch konsequente Mechanisierung aller Arbeiten im Stollen: mehrere auf Lafetten montierte, schwere Bohrhämmer auf einem Wagen oder auf einem verschiebbaren Gerüst ersetzten von Hand oder allenfalls von einer Stütze gehaltene Bohrhämmer (Bild 31); Schaufelbagger zum Aufnehmen des gesprengten Felsens und zum Beladen der Kippwagen batteriebetriebener Züge lösten die Handschaufeln ab; in Bohrlöchern versetzte Anker, eventuell kombiniert mit Stahlnetzen und auf den Fels gespritztem Mörtel sowie Stahlbogen und Bleche traten als Felssicherung an die Stelle von Holzzimmerung, die vor der Betonierung hatte entfernt werden müssen; fahr- und zusammenklappbare Metallschalungen sowie Pumpen dienten nun anstelle der früheren Holz- oder Metalltafelschalung zur Betonierung der Verkleidung (Bild 32). Dank diesen Verbesserungen wurden die mittleren Ausbruchsleistungen auf rund 10 m im Tag gesteigert und die Gesamtbauzeiten wesentlich verkürzt.

Der vorderhand letzte Mechanisierungsschub setzte ein, als in den USA und in Deutschland Stollenbohrmaschinen entwickelt wurden, die den Fels wegfräsen und so den gefährlichen Ausbruch mittels Sprengung überflüssig machen. Nachdem 1965 und 1966 in der Schweiz erstmals zwei Abwasser-

ingenieurs Jules F. Brutin, 1903–1965, nicht nur mit der richtungsweisenden Bogenstaumauer Rossens versehen, sondern auch mit bemerkenswerten Grundablässen und einer ebensolchen Wasserfassung (Bild 20 und 26 [20]).

Im Anschluss daran steigerte man binnen zehn Jahren die Ringzugkraft auf den Spitzenwert von 4400 kN pro m, und zwar im Triebwasserstollen vom Stausee Grande Dixence nach Fionnay, 23 km südlich von Sitten, der unter 2,14 Megapascal Druck steht [21]. Das Projekt für diese – in bezug auf Staumauer mit Grundablass und Wasserfassung, Druckstollen und -schächte sowie Kraftwerksleistung immer noch Schweizer Rekorde haltende – Anlage stammte vom Walliser Bauingenieur Marc Lorétan, 1887–1951, Direktor der Energie de l’Ouest-Suisse (EOS) in Lausanne. Weltweit liegt heute der nicht unproblematische Höchstwert der Ringzugkraft in Druckstollen bei rund 20 000 kN pro Meter, wozu noch die kurzfristigen, stark gestiegenen Zusatzbeanspruchungen durch Pumpspeicherbetrieb und Netzregelung kommen [22].

Mechanisierung des Stollenbaus

In der Schweiz nahm nach dem Zweiten Weltkrieg aber auch die Länge

der Stollen und vor allem die der Strecken zwischen den Angriffspunkten zu (Tabelle VII). Dies war nur möglich

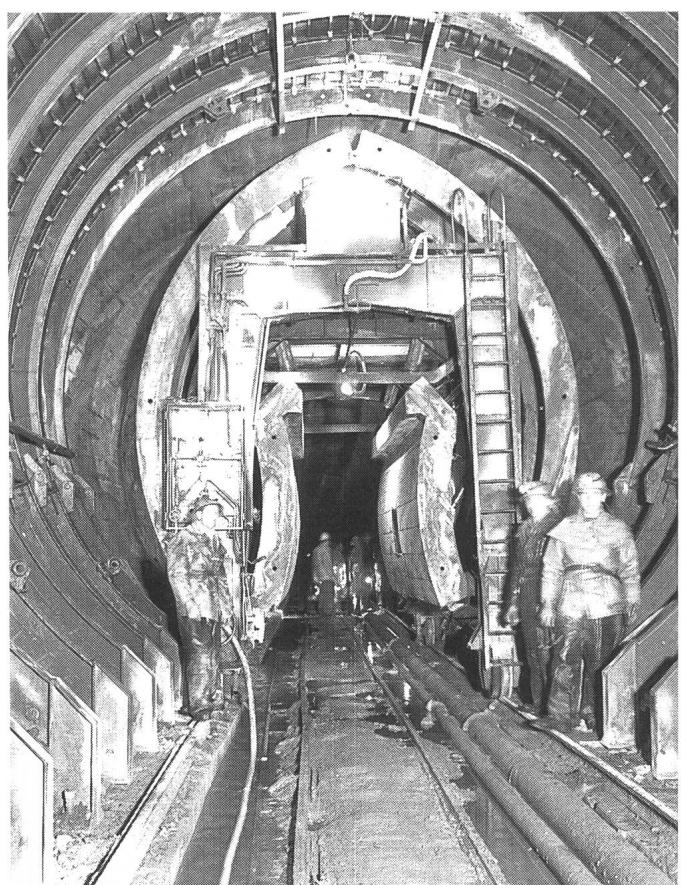


Bild 32
Schalwagen zur
rationellen Betonie-
rung von Stollen-
verkleidungen

Foto KHR, Thusis

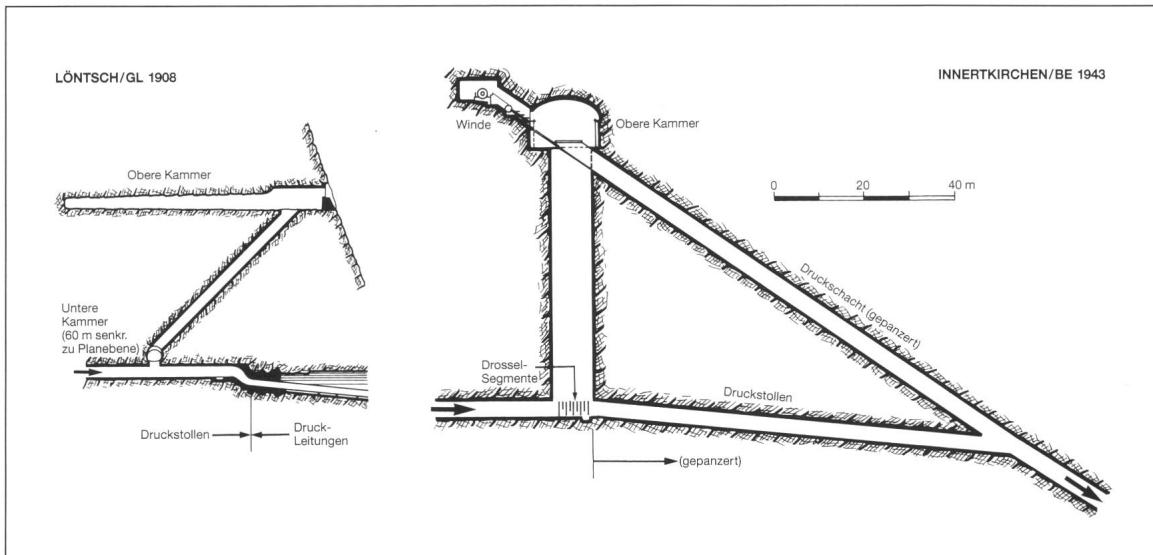


Bild 33
Gleichmassstäbliche
Vertikalschnitte der
Wasserschlösser der
Kraftwerke Löntschen
und Innertkirchen

stollen mit amerikanischen Maschinen vorgetrieben worden waren, kam 1967 auf 1,5 km Länge des Triebwasserstollens Tinzen-Tiefencastel, 21 km südlich von Chur, eine schweizerische Konstruktion zum Einsatz [23]. Beim Kraftwerk Lötschen, 33 km nordöstlich von Sitten, wurde 1973 und 1974 erstmals die gesamte, 8 km lange Triebwasserleitung mit einer amerikanischen und zwei deutschen Fräsmaschinen erbohrt, wobei die mittlere Ausbruchsleistung 12 m im Tag betrug [24]. Bei den wenigen Kraftwerkbauten danach wurden die meisten Stollen ebenfalls mit Maschinen ausgebrochen, doch zeigte Ende der 1980er Jahre das Versagen aller vier, allerdings unter schwierigen Felsverhältnissen eingesetzten Geräte bei den Kraftwerken Ilanz, 30 km südwestlich von Chur, die Grenzen der noch jungen Technik auf.

Druckleitungen

Die Schweizer Hochdruckkraftwerke wurden fast durchweg «klassisch» ausgelegt: ein schwach geneigter Stollen führt bis oberhalb des Maschinenhauses, daran anschliessend wird die Fallhöhe in einer Druckleitung zum Maschinenhaus hinab konzentriert. Zwischen diesen beiden Teilen der Triebwasserleitung ist ein Puffer nötig, um die beim Zu- und Abschalten des Kraftwerkes entstehenden Druckschwankungen im Betriebswasser aufzufangen. Solche meist unterirdisch angeordneten Puffer bzw. «Wasserschlösser» waren anfangs als einfache Schächte ausgebildet, eventuell mit einer Verengung am unteren Ende, um den Wasserein- bzw. -austritt zu drosseln – zum Beispiel beim 1899 vollendeten Kraftwerk Spiez

am Thunersee [9]. Aber schon beim Kraftwerk Lötschen wurden 1908 an den Schacht oben und unten Expansionskammern angeschlossen, um die Wasserspiegelschwankungen im Schacht zu begrenzen (Bild 33, links [17]).

Das 1943 erbaute Kraftwerk Innertkirchen, 66 km südöstlich von Bern, erhielt als zweite Anlage in der Schweiz eine unterirdische Druckleitung in Form eines Druckschachtes. Man verlängerte diese Leitung bis zur oberen

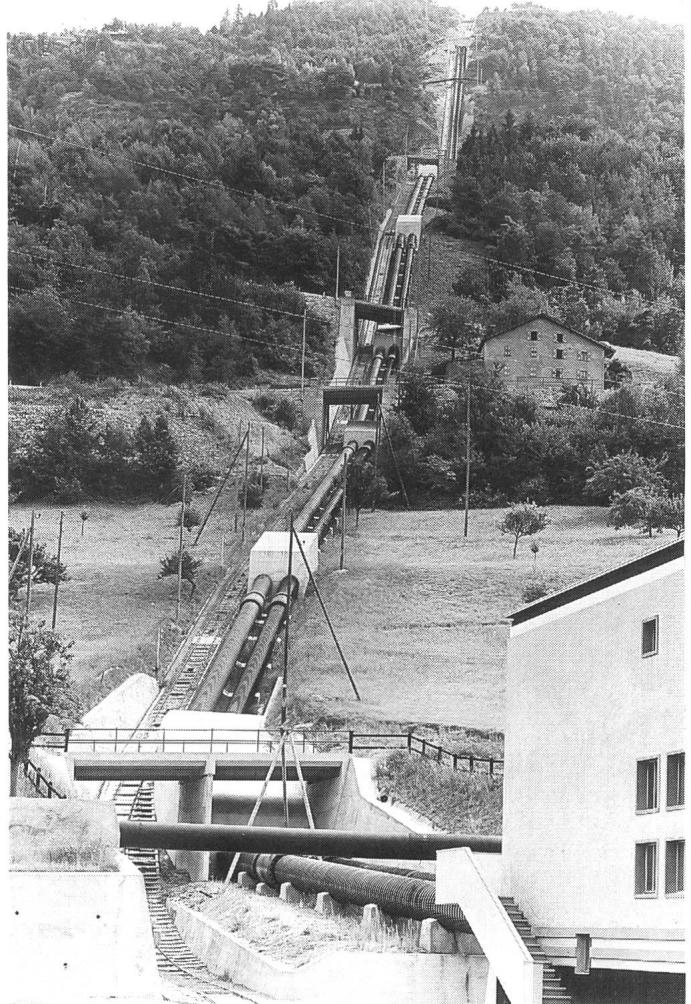


Bild 34
Teil der rund 5,5 km
langen Druckleitung
zum Kraftwerk
Chandoline im Wallis
Foto EOS, Lausanne

Betriebs aufnahme (-ende)	Kraftwerk (Name/Kanton)	Anzahl	Röhren Länge (m)	Durch- messer (m)
1886	Taulan/VD	2	907	0,45
1887	Les Moyats/NE	1	128	1,20
1890	Neuhausen/SH	2	60	2,50
1892	Im Sand/GR	1	1000	0,80
1894	Frauenkirch/GR	1	1920	0,70
1900	Flums/SG	1	3498	0,60
1901(–1948)	Bois Noir/VS	1(3)	470	2,70
1911	Chippis (Rhone)/VS	2	309	3,00
1914	Fully/VS	1	4626	0,50
1935	Chandoline/VS	2	5476	
1960	Nendaz/VS	1	849	3,10

Expansionskammer und liess in diese auch einen Vertikalschacht vom Druckstollen her münden: Damit war ein Wasserschlössertyp geschaffen, der ohne untere Expansionskammer auskommt, dafür aber einer Drosselung bedarf (Bild 33, rechts [25]). Insbesondere die Drosselung ist unter Hydraulikern und Turbinenkonstrukteuren umstritten, und je nach Standpunkt wurden in der Folge Zweikammer-Wasserschlösser oder solche vom Typ «Innertkirchen» angewandt.

Eine Druckleitung besteht aus einem oder mehreren parallelen Rohren, die auf gemauerten oder betonierten Sockeln ruhen und meist in grösseren Abständen bzw. an Krümmungen durch Verankerungsblöcke festgehalten werden (Bild 34). Vor allem in neuerer Zeit sind sie oft in Gräben verlegt worden, die man danach wieder zuschüttete. Dabei erfolgte die Montage – von unten nach oben – meist mit Hilfe einer Standseilbahn, die dann in der Regel für den Betrieb beibehalten und gelegentlich auch Dritten, zum Beispiel Touristen, zugänglich gemacht wurde. Die Verbindung der einzelnen Rohre wie auch deren Herstellung aus gebogenen Stahlblechen nahm man anfänglich durch Nieten vor, seit Anfang des 20. Jahrhunderts mittels Schweißung.

Entsprechend den Fortschritten der Metallurgie durfte man den Rohren ständig höhere Wasserdrücke bzw. Ringzugkräfte zumuten (Bild 29). Den diesbezüglichen Schweizer Rekord hält mit über 17 Megapascal bzw. 8400 kN pro Meter Länge noch immer die 5,5 km lange, doppelröhrlige Druckleitung des Kraftwerkes Chandoline. Zwei Kilometer südöstlich von Sitten gelegen, wurde es zusammen mit seiner Pfeilerstaumauer Dixence unter Leitung des schon genannten Lorétan von 1930 bis 1935 erbaut [EOS 1944]. Weltweit stehen die Werte der maximalen Ringzugkraft heute bei mehr als 20 000 Kilo-

newton, wobei neben der Stahlqualität auch die verschweissbare Blechstärke eine Grenze setzt. Die Entwicklung der schweizerischen Druckleitungen bezüglich Länge und Durchmesser zeigt Tabelle VIII.

Druckschächte

In Anlehnung an einige wenige schwedische, italienische und österreichische Vorbilder liess Kaech (Bild 35) beim bereits erwähnten Kraftwerkbau im Oberhasli, 80 km südöstlich von Bern, im Jahre 1932 zum erstenmal in der Schweiz die Druckleitung in einen schrägen Felsschacht einbetonieren [27]. Dies erlaubte nicht nur schwierigen Geländeverhältnissen sowie Steinschlag- oder Lawinengefahr auszuweichen,

Tabelle VIII
Schweizer Rekord- druckleitungen.
(N.B.: Durchmesser am untern Leitungsende, Rekorde fett)

sondern auch einen Teil des Wasserdrucks – wie in einem Druckstollen – an den umgebenden Fels abzuleiten. Mit dieser Ableitung befassten sich in der Folge die meisten theoretischen Untersuchungen und auch die oft kostspieligen Feldversuche, bis man nach einigen spektakulären Schadensfällen erkannte, dass die Panzerung vor allem durch den äusseren Wasserdruk im Fels gefährdet wird, wenn – wie bei Revisionen – der Schacht leer ist. Daraufhin machte man die Panzerung meistens durch entsprechende Mehrdicke einbeulsicher.

Wie bei den Druckstollen wurde der Schweizer Rekord bezüglich Ringzugkraft in Druckschächten bereits 1960 beim Grande Dixence-Projekt erreicht (Bild 29 [21]). 1963 steigerte man beim Kraftwerk Tierfehd, 19 km südlich von Glarus, den Wasserdruk noch leicht auf 10,2 Megapascal. Wie sich die Druckschächte hinsichtlich Länge und Durchmesser entwickelten, ist in Tabelle IX zusammengestellt.

Stollenbohrmaschinen wurden in der Schweiz zuerst beim Bau von Druckschächten angewendet, bevor man sie – abgesehen vom kurzen Versuch im Triebwasserstollen Tinzen-Tiefencastel – bei Druckstollen einsetzte. Die Arbeit in einem Druckschacht war ja auch besonders schwer, denn die Schachtneigung betrug 80–90%, um dem gesprengten Fels das Abgleiten unter Schwerkraft zu erlauben. Als erster Druckschacht auf der Welt mit einer deutschen Maschine erbohrt, wurde 1968 und 1969 der 1140 m lange, geneigte Teil des Schachts zur Zentrale Châtelard der Kraftwerkgruppe Emosson, 38 km südwestlich von Sitten (Bild 36 [28]). Diesem Beispiel folgten fast alle die wenigen späteren Kraftwerkbaute.



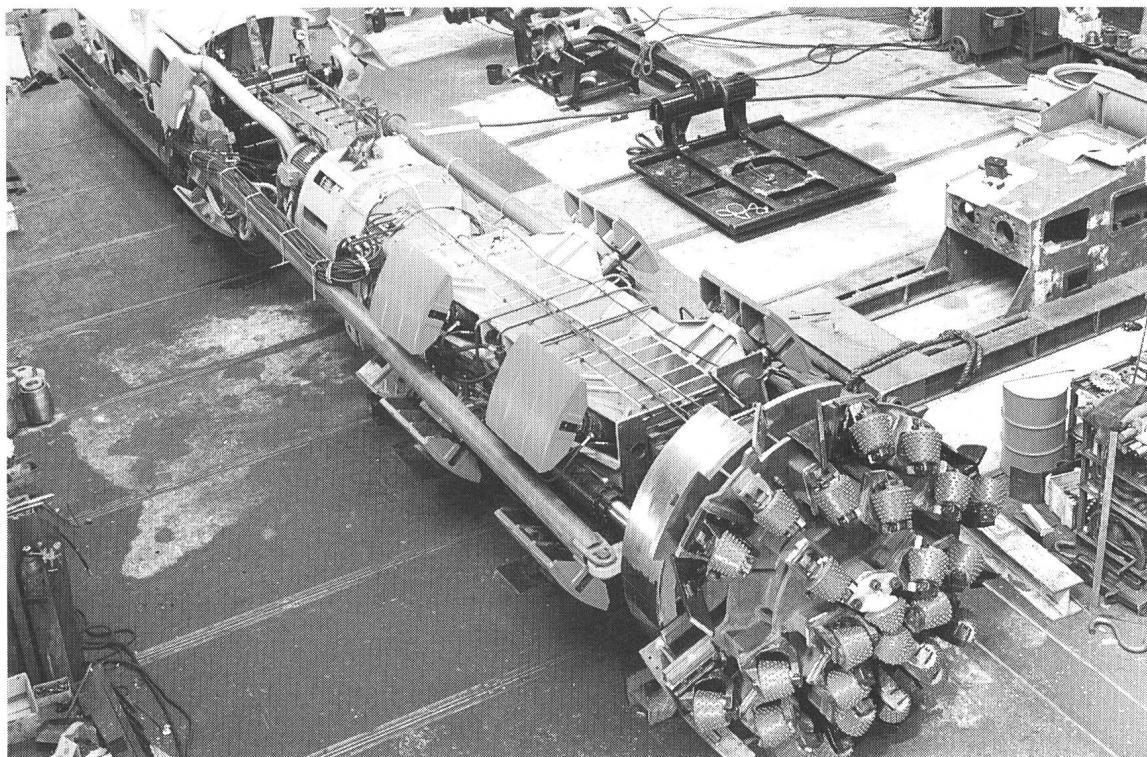
Bild 35 Dr. h. c. Arnold Kaech, 1881–1965

Maschinenhäuser in Kavernen

Am Ende von Druckleitung oder Druckschacht, bei Flusskraftwerken nach Durchströmen des Rechens, tritt das Betriebswasser ins Maschinenhaus ein, wo seine potentielle Energie in Elektrizität umgewandelt wird. Das Maschinenhaus ist die Domäne der Maschinen- und Elektroingenieure. Baufachleute liefern dazu die Fundamente und die Gebäudehülle (Bild 37). Eine immer häufigere Lösung für die Hülle war der Fels, das heißt die unterirdische Anordnung von Turbinen und Generatoren, meist auch der Transformatoren zur Umspannung für die Fernübertragung.

Bild 36
Werkstattaufnahme
der Fräse für den
Ausbruch des Druck-
schachtes Corbes der
Kraftwerke Emosson

Foto A. Wirth & Co.,
Erkelenz/D



Wie bei den Druckschächten auf wenige Präzedenzfälle aufbauend, war es wiederum Kaech, der in den Jahren von 1940 bis 1943 die Zentrale Innertkirchen der Kraftwerke Oberhasli mit dem ersten unterirdischen Maschinenhaus der Schweiz errichtete [25]. Fünf vertikalachsige, je 48 MW leistende Stromerzeugungseinheiten sowie die Transformatoren sind in einer schmalen, hohen Kaverne von $45\,000\text{ m}^3$ Ausbruchsvolumen untergebracht. Die Sicherheitsschieber vor den Düsen der Pelton-turbinen wurden, in einem gesonderten Parallelstollen installiert (Bild 38, links). Für die 47-MW-Zentrale Peccia, 41 km nordwestlich von Bellinzona, und für die zahlreichen damals – um das Jahr 1955 – in Bau oder unmittelbar vor Baubeginn stehenden Maschinenhäuser der Tessiner Kraftwerkgruppen Maggia und Blenio, wurde dann ein Kavernentyp geschaffen, der mit einem einzigen Gewölbe sämtliche elektromechanischen Einrichtungen überspannt (Bild 38, rechts [29]). Damit nahm die Spannweite von knapp 20 m in Innertkirchen

auf 27 m in Peccia zu, gleichzeitig verminderte sich aber die Kavermenhöhe. In der Schweiz wurden fast alle Kavernengewölbe mit Beton verkleidet, und nur im waadtländischen Veytaux wurde 1971 die im Ausland propagierte, nicht unbedingt billigere und sicherlich nicht dauerhaftere Gewölbesicherung mit Ankern angewendet, die in Bohrlöchern versetzt werden [30].

Beide beschriebenen Kavernentypen kamen bei der steigenden Anzahl unterirdischer Maschinenhäuser weiterhin nebeneinander zur Ausführung. Seit Innertkirchen beherbergen Kavernen rund die Hälfte der neu zugebauten Kraftwerksleistung, das heisst gut 4800 MW in etwa 40 Kavernen. Deren Ausbruchsvolumen erreichte 1962 in Ferrera, Graubünden, und beim oben genannten Veytaux Spitzenwerte von nahzu $80\,000\text{ m}^3$. Hauptgründe für die unterirdische Anordnung von Maschinenhäusern waren Platzmangel in den oft engen Gebirgstälern, Steinschlag- oder Lawinengefahr, sicherheitspolitische Überlegungen und die grosse Frei-

heit in der räumlichen Disposition der Gesamtanlage. Nicht zuletzt führten oft auch landschaftliche Rücksichten zur Wahl der Kavernenlösung.

Pumpspeicheranlagen

Abschliessend sei noch ein kurzer Blick auf die Entwicklung der elektromechanischen Ausrüstung der Kraftwerke in den letzten hundert Jahren geworfen, die mindestens so rasant verlief wie die der wasserbaulichen Anlageteile. Dabei ist es interessant festzustellen, dass die in einem einzigen Maschinenhaus installierte Gesamtleistung bereits 1960 ihr Maximum erreichte (Bild 39, oben). Dies trifft jedoch nur auf die Schweiz zu, denn weltweit liegt der Höchstwert inzwischen bei 12 600 MW oder dem 32fachen, nämlich beim Kraftwerk Itaipú an der brasilianisch-paraguayischen Grenze! Hinsichtlich der Leistung pro Turbine hingegen hielt die Zunahme auch in der Schweiz bis etwa 1980 an (Bild 39, unten). Das Schweizer Maximum von rund 100 MW je Turbine wurde international allerdings längst überholt, wobei jedoch festzuhalten ist, dass die schweizerische Maschinenindustrie an der weltweiten Entwicklung weiterhin massgeblich teilhat. 100 MW Leistung entsprechen übrigens rund 20 000 Wasserrädern, das heisst etwa doppelt so vielen, wie es in der Schweiz vor Einführung der Turbinen gab.

Ein besonderer Aspekt der elektromechanischen Ausrüstung von Wasser-

Betriebs- aufnahme	Kraftwerk (Name/Kanton)	Länge (m)	Durchmesser (m)
1932	Handeck I/BE	1177	2,10
1943	Innertkirchen I/BE	1792	2,40
1953	Châtelot/NE	120	3,00
1961	Sils i. D./GR	1073	3,90
1962	Bärenburg/GR	640	4,00
1964	Stalden/VS	2223	2,10

Tabelle IX
Schweizer Rekord-
druckschächte.
(N.B.: Durchmesser
am untern Schacht-
ende, Rekorde fett)



Bild 37
Luftaufnahme des von den renommierten Architekten Gebr. Pfister, Zürich, gestalteten Rheinkraftwerkes Eglisau
Foto NOK

kraftwerken ist die immer häufigere Installation von Speicherpumpen. Sie erlauben es, in Zeiten niedrigen Stromverbrauchs Wasser aus einem Unterbecken in ein Oberbecken zu fördern, um es dann zu Spitzenzeiten zu turbinieren – wohlgerichtet durch dieselbe Triebwasserleitung. Obschon dabei etwa ein Drittel der Energie verlorengieht, ist die Pumpspeicherung wegen des Unterschieds der Marktpreise von Schwachlast- und Spitzstrom oft wirtschaftlich interessant. Zudem bietet sie die einzige Möglichkeit, Elektrizität in grösseren Mengen zu speichern. Erste derartige Anlagen entstanden in

der Schweiz schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts anstelle der damals zur Spitzendeckung meistens eingesetzten Dampfmaschinen.

Die Hauptdaten der frühen wie späteren Schweizer Pumpspeicheranlagen sind in Tabelle X zusammengestellt. Wie die nicht darin aufgeführten reinen Zuleitungswerke zu Stauseen – zum Beispiel bei Grande Dixence vier mit zusammen 186 MW Leistung – waren viele der Speicherpumpen ursprünglich für die Speicherung von Sommerabflüssen für den Winter gedacht. Sie können aber auch zur täglichen Umwälzung von Schwachlast- auf Spitz-

strom verwendet werden. Besonderes Interesse haben in letzter Zeit Werke gewonnen, die eine solche Umwälzung über mehrere Tage ermöglichen, zum Beispiel über das Wochenende oder bei kürzerem Stillstand eines Kernkraftwerkes. Typische Vertreter der letztgenannten Art von Pumpspeicherwerken sind die Anlagen Veytaux, 25 km südöstlich von Lausanne, und Grimsel II der Kraftwerke Oberhasli [31]. Die Gesamtleistung aller Speicherpumpen in der Schweiz beträgt heute gut 1300 MW, oder 9% der Leistung aller Elektrizitätserzeugungsanlagen einschliesslich der Kernkraftwerke.

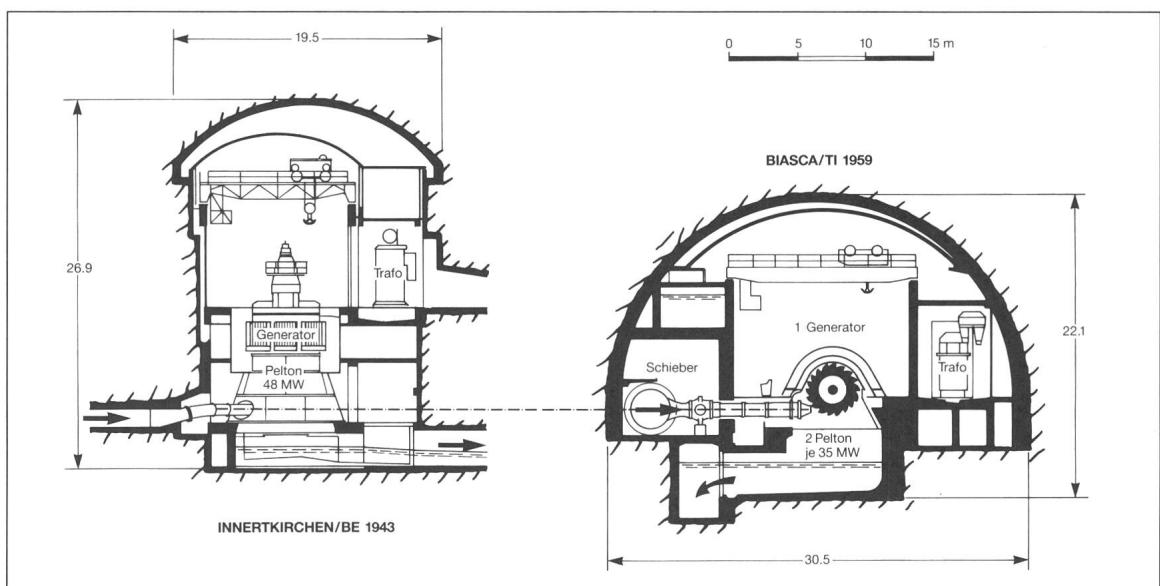


Bild 38
Querschnitte der Maschinenkavernen Innertkirchen und Biasca

Literatur

- [1] Stambach, E.: Über die Entwicklung der schweizerischen Niederdruck-Wasserkraftanlagen in den letzten 50 Jahren. «Schweiz. Bauzeitung» 1944 (Bd. 124), S. 321–325 und 336–340.
- [2] Ludin, A.: Die Wasserkräfte. J. Springer, Berlin 1913 (S. 202–203, 834–836 und 1241–1242).
- [3] NOK (Nordostschweizerische Kraftwerke AG): Das Kraftwerk Wildegg-Brugg. «Schweiz. Bauzeitung» 1956, Nr. 412.
- [4] Erbiste, P. C.: Hydraulic Gates, the State-of-the-Art. «Int. Water Power and Dam Construction» April 1981, p. 43–48.
- [5] Aegeuter, A. & Dr. O. Bosshardt AG: Das Kraftwerk Birsfelden. «Wasser- und Energiewirtschaft» 1954, S. 165–176.
- [6] Schnitter, N.J.: Geschichte des Talsperrenbaus in der Schweiz. «wasser, energie, luft» 1985, S. 185–192 (français/english: Barrages suisses/ Swiss Dams. Schweiz. Nationalkom. Grosses Talsperren, Zürich, 1985).
- [7] Glossop, R.: The Invention and Development of Injection Processes. «Geotechnique» 1960, p. 91–100, and 1961, p. 255–279.
- [8] Biedermann, R.: Zur Hochwassersicherheit von Talsperren. «wasser, energie, luft» 1986, S. 137–142.
- [9] Wasserkraftanlagen der Vereinigten Kander- und Hagneckwerke AG in Bern: Das Elektrizitätswerk Spiez. «Schweiz. Bauzeitung» 1908 (Bd. 52), Nr. 11ff.
- [10] Sarrasin, A.: Notes sur les barrages à arches multiples. «Schweiz. Bauzeitung» 1939 (Bd. 113), S. 231–235.
- [11] Schmidhauser, P.: Les travaux d'amenée dans la Grande Eau des eaux du lac d'Arnon. «Bull. techn. Suisse rom.» 1923, p. 102–228.
- [12] Meyer-Peter, E.: Die Entwicklung der baulichen Bestandteile der hydro-elektrischen Werke. «Schweiz. Bauzeitung» 1927 (Bd. 89), S. 107–114.
- [13] Härry, A.: Die Fischwege an Wehren und Wasserwerken in der Schweiz. Rascher, Zürich 1917.
- [14] Elektrizitätswerk Beznau an der Aare. «Schweiz. Bauzeitung» 1907 (Bd. 49), Nr. 6–13.
- [15] Marti, M.: Zur Geschichte (des Kraftwerks Felsenau). «wasser, energie, luft» 1989, S. 278–282.
- [16] Kürsteiner, L.: Das Elektrizitätswerk Kubel bei St.Gallen. «Schweiz. Bauzeitung» 1904 (Bd. 43), Nr. 14ff.
- [17] Ehrenspurger, J.: Elektrizitätswerk am Lötsch. «Schweiz. Bauzeitung» 1910 (Bd. 55 u. 56).
- [18] Lochmann, O. und Schmucki, W.: Das Kraftwerk Obermatth im Engelbergertal, «Schweiz. Bauzeitung» 1964, S. 641–648.
- [19] Die Wasserkraftanlagen Biaschina und Ticinetto: «Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen» 1913, Nr. 1–4.
- [20] Bruttin, J. F.: L'aménagement hydroélectrique de Rossens-Hauterive après deux ans d'expérience. «Bull. tech. Suisse romande» 1951, p. 69–85.
- [21] Grande Dixence. «Water Power» 1963, Nos. 4 and 5.
- [22] Schleiss, A.: Bemessung von Druckstollen. «Mitt. Versuchsanst. Wasserbau ETHZ» 1985/86, Nr. 78/86. (Zusammenfassung: «wasser, energie, luft» 1986, S. 17–24.)
- [23] Lauber, E. und Brodbeck, H. W.: Erfolgreicher Einsatz der Habegger-Tunnelfräsmaschine im Hartgestein. «Schweiz. Bauzeitung» 1968, S. 917–924.
- [24] Aemmer, F.: Mechanische Stollenvortriebe beim Bau des Kraftwerkes Lötschen. «Mitt. Schweiz. Gesellsch. Boden- und Felsmech.» 1975, Nr. 91, S. 1–3.
- [25] Jegher, W.: Das Kraftwerk Innertkirchen: «Schweiz. Bauzeitung» 1942 (Bd. 120), Nr. 3ff.
- [26] EOS 1919–1944. Energie de l'Ouest Suisse S.A., Lausanne 1944.
- [27] Jahn, W.: Denkschrift über den Bau des Kraftwerkes Handeck. Kraftwerke Oberhasli, Innertkirchen 1932.
- [28] Aemmer, F.: Einsatz einer Tunnelbohrmaschine im Châtelard beim Bau des Druckschachtes Corbes der Kraftwerke Emosson. «Schweiz. Bauzeitung» 1970, 5, 267–273.
- [29] Lüthi, H. und Fankhauser, H.: Beitrag zur Entwicklung von Kavernenbauten. «Wasser- und Energiewirtschaft» 1967, S. 345–356.
- [30] Rescher, O. J.: Soutenement de la centrale en caverne de Veytaux par tirants en rocher et béton projeté. «Bull. tech. Suisse romande» 1968, p. 249–260.
- [31] Zingg, F.: Der Weiterausbau der Kraftwerke Oberhasli. «Schweiz. Bauzeitung» 1974, S. 1002–1005.
- [32] Zurfluh, E.: Der Neubau des Stauwehres Beznau. «wasser, energie, luft» 1978, S. 78–81.
- [33] Lier, P. und Müller, H.P.: Strömungsbedingte Schäden an einem Stauwehr. «wasser, energie, luft» 1989, S. 33–38.
- [34] Wasserkraftanlage Gösgen an der Aare. «Schweiz. Bauzeitung» 1920 (Bd. 75) Nr. 1ff.

Bild 39
Entwicklung der Gesamtleistung von Wasserkraftwerken in der Schweiz (oben) und der Leistung pro Rad der verschiedenen Turbinentypen (unten)

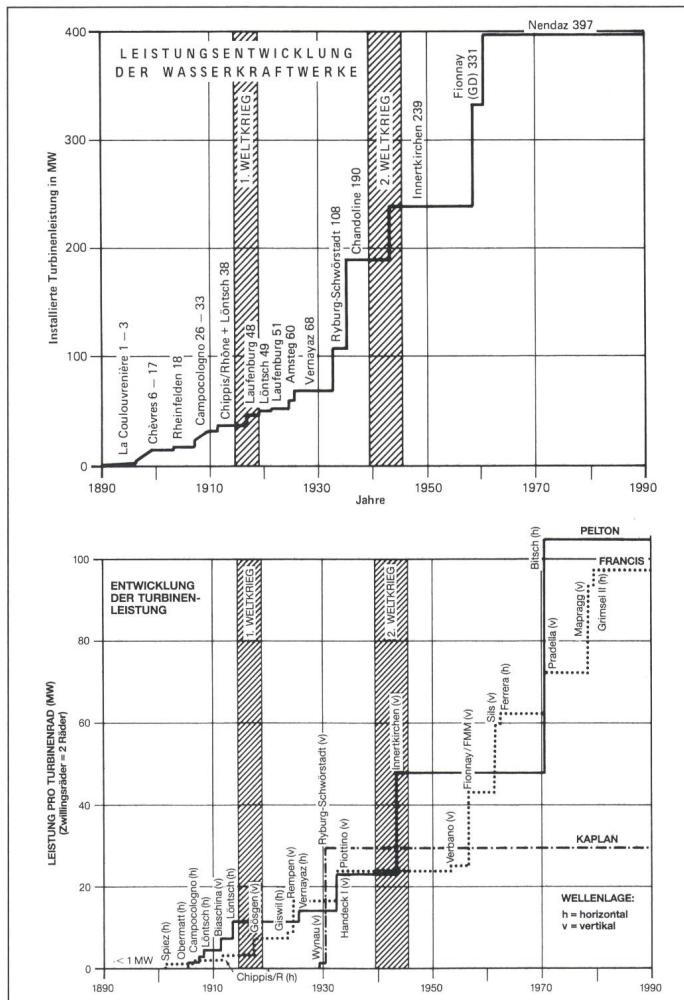


Tabelle X
Schweizer Pumpenspeicheranlagen für Umwälzbetrieb

Betriebsaufnahme (Umbau)	Kraftwerk (Name/Kanton)	Turbinenleistung (MW)	Pumpleistung (MW)	Verhältnis Pumpen – Turbinen
1904 (25) ¹	Ruppoldingen/SO	1(3)	1(3)	0,7 (0,8)
1909 (40)	Schaffhausen/SH	2	2	1,0
1926	Rempen/SZ	66	15	0,2
1942	Oberrems/VS	8	5	0,7
1947 (73)	Etzel/SZ	90 (133)	32 (53)	0,4*
1954	Grimsel I/BE	34	20	0,6*
1955	Peccia/TI	47	22	0,5
1958	Motec/VS	69	32	0,5
1958	Zervreila/GR	20	6	0,3
1959	Löbbia/GR	81	30	0,4
1962 (71)	Ferrera/GR	185	42 (80)	0,2 (0,4)
1968	Robiei/TI	170	158	0,9*
1969	Ova Spin/GR	68	47	0,7*
1971	Veytaux/VD	240	240	1,0*
1974	Handeck III/BE	55	55	1,0
1977	Châtelard II/VS	78	31	0,4
1978	Mapragg/SG	280	159	0,6*
1979	Grimsel II/BE	388	351	0,9*
1986	Zermeiggern/VS	74	43	0,6

¹ 1960 abgebrochen

* Auch mehrtägiger Umwälzbetrieb möglich

- [30] Rescher, O. J.: Soutenement de la centrale en caverne de Veytaux par tirants en rocher et béton projeté. «Bull. tech. Suisse romande» 1968, p. 249–260.
- [31] Zingg, F.: Der Weiterausbau der Kraftwerke Oberhasli. «Schweiz. Bauzeitung» 1974, S. 1002–1005.
- [32] Zurfluh, E.: Der Neubau des Stauwehres Beznau. «wasser, energie, luft» 1978, S. 78–81.
- [33] Lier, P. und Müller, H.P.: Strömungsbedingte Schäden an einem Stauwehr. «wasser, energie, luft» 1989, S. 33–38.
- [34] Wasserkraftanlage Gösgen an der Aare. «Schweiz. Bauzeitung» 1920 (Bd. 75) Nr. 1ff.

LICHT IN SEINER SCHÖNSTEN FORM

...erstrahlt über Europa. Durch den Zusammenschluß mit Tungsram und dem Geschäftsbereich Lichtquellen von Thorn hat GE Lighting die Stärken, den Erfolg und die Erfahrungen unter einem Dach vereint. Dies spiegelt sich im Sortiment von über 2.800 Lichtprodukten wieder.

Dieses Sortiment trägt in ganz Europa einen gemeinsamen Namen: **GE Lighting**. Um der Beleuchtungsbranche in Europa ausschließlich hochwertige Spitzenprodukte bieten zu können, wird die Produktpalette ständig durch Forschung und Entwicklung optimiert.

Wenn Sie mehr über GE Lighting wissen möchten, und wie wir auch Ihnen helfen können, in Ihrem Unternehmen neue Impulse zu setzen, dann wenden Sie sich an folgende Adresse:



GE Lighting

Ein Unternehmen der General Electric Company, U.S.A.

*GE Lighting AG, Manessestrasse 152, 8027 Zürich.
Tel.: 01-202 1100. Fax: 01-202 1136.*

