Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 82 (1990)
Heft: 9

Artikel: Der Ausbau der schweizerischen Wasserkraft im 20. Jahrhundert. Teil 2, Wasserfassungen, Trinkwasserleistungen und Maschinenhäuser
Autor: Schnitter, Niklaus
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939827

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: 24.10.2025

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

Der Ausbau der schweizerischen Wasserkraft im 20. Jahrhundert

Niklaus Schnitter

Teil 2. Wasserfassungen, Triebwasserleitungen und Maschinenhäuser

Teil 1: Einleitung und Stauhaltungen ist in «wasser, energie, luft» 82 (1990) Heft 5/6, S. 98–108, erschienen.

3. Wasserfassungen

3.1 Drucklose Fassungen

Das von den vorbeschriebenen Wehren aufgestaute Wasser wurde anfänglich meist mittels eines Kanals (seltener Stollens) dem ausserhalb des Flusses oder an dessen Ufer gelegenen Maschinenhaus zugeleitet. Allerdings stand dasjenige des 1896 in Betrieb genommenen Kraftwerks Chèvres (17 MW) bei Genf bereits neben dem Wehr, wenn auch schräg nach Unterwasser verlaufend und mit einer Zulaufbucht an seiner Rückseite versehen. Erstmals in einer Linie quer über den Fluss angeordnet wurden Wehr und Maschinenhaus beim Kraftwerk Laufenburg (83 MW), eine Anordnung, die darnach die häufigste wurde [5]. Die Zunahme der Betriebswassermengen der Kanalkraftwerke sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Ein Hauptproblem bildet bei solchen Fassungen, wie auch bei den Turbineneinläufen in den unmittelbar neben dem Wehr angeordneten Maschinenhäusern, die Fernhaltung des vor allem bei Hochwasser in oft grossen Mengen vom Gewässer mitgeführten Holzes und übrigen Geschwemmsels. Was nicht mit entsprechender Strömungsführung durch das Wehr abgeleitet werden kann, wird von steil stehenden Rechen abgefangen. Für die Rechenreinigung wurde 1910 am Rhonekraftwerk Chèvres erstmals eine verschiebbare Maschine installiert, deren waagrechte Harke zwischen die Rechenstäbe griff und das Geschwemmsel aus dem Wasser zog [6]. Ab 1925 konnte dieses direkt in eine Rinne abgelagert werden, in der es ins Gewässer unterhalb des Kraftwerkes zurückgespült wurde [20]. Das blieb viele Jahre Standardprozedur bei allen schweizerischen Flusskraftwerken. In neuerer Zeit muss das Rechengut entsorgt werden (Kehrichtdeponie oder -verbrennungsanlage, Kompostierung).

Die für die Geschwemmselabwehr günstigste Strömungsführung steht oft in Gegensatz zu der für die Fernhaltung von Geschiebe optimalen, wie z. B. bei Anordnung der Wasserfassung am äusseren Rand einer Flusskrümmung. Die Drallbewegung in dieser führt zwar das Geschwemmsel nach aussen zur Fassung, aber das Geschiebe zum gegenüberliegenden Innenrand. Letzteres ist eine der Grunderkenntnisse der Ende des 19. Jahrhunderts aufgekommenen Versuche an hydraulischen Modellen, wie sie in der Schweiz seit 1928 an der EPFL unter Leitung *Stuckys* und seit 1930 an der ETHZ auf Initiative von Prof. Dr. h.c. *Eugen Meyer-Peter* (1883–1969) erfolgten (Bild 23). Bei der Auslegung von Fassungen an Gebirgsgewässern wurde meistens der Fernhaltung des Geschiebes der Vorrang eingeräumt. Die grössten derselben sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Neben den sieben in Tabelle 5 aufgeführten grössten Gebirgswasserfassungen wurden mehr als doppelt so viele gebaut, die 10 bis 19 m^3/s fassen und unzählige von unter 10 m^3/s Ableitvermögen. Denn zur Füllung vor allem der nach dem Zweiten Weltkrieg erstellten grossen Stauseen in den Alpen musste diesen Wasser aus den Nachbartälern oder gar noch von weiter her zugeleitet werden (Grande Dixence [VS]) aus über 30 km Luftlinie!). Ab den 1950er Jahren kamen für die kleineren Wasserfassungen vorwiegend solche mit einem geneigten Rechen im Bett des Gewässers zur Anwendung (Bild 25).

Bei solchen Wasserentnahmen nach unten, aber sogar bei gut konzipierten seitlichen Wasserfassungen, ist der Eintritt von Feinkies und besonders von Sand nicht immer zu 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 wurde 1909 die Wasserfassung des Kraftwerkes Ackersand I im Wallis mit einer Entsandungsanlage versehen, die anlässlich einer Erweiterung 1917 auf das 1911 vom Schweizer Ingenieur *Henri Dufour* (1877–1966) patentierte System umgebaut wurde. Dieses benutzt lange Absetzkammern von dreieckigem Querschnitt, an deren Boden (= Dreiecksspitze) der Sand durch viele kleine Klappen laufend abgesaugt wird [20]. Im Gegensatz dazu beruht die vom Schweizer Wasserbauer Dr. h.c. *Jakob Büchi* (1879–1960) ebenfalls aufgrund von Modellversuchen (1917) entwickelte Konstruktion auf der «Abschöpfung» des saube-

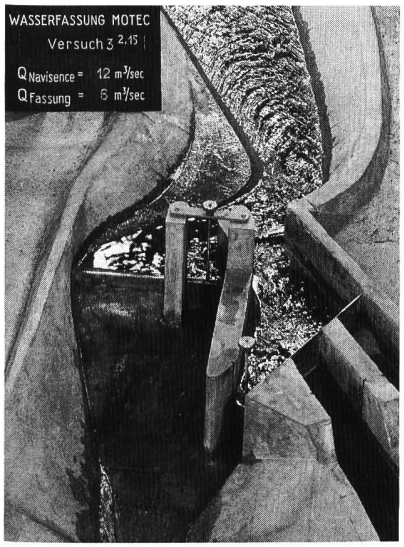


Bild 23. Modell der Wasserfassung Motec an der Navissence/VS für maximal 12 m^3/s; beachte künstlich erzeugte Kurvenwirkung (Foto Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH, Zürich).

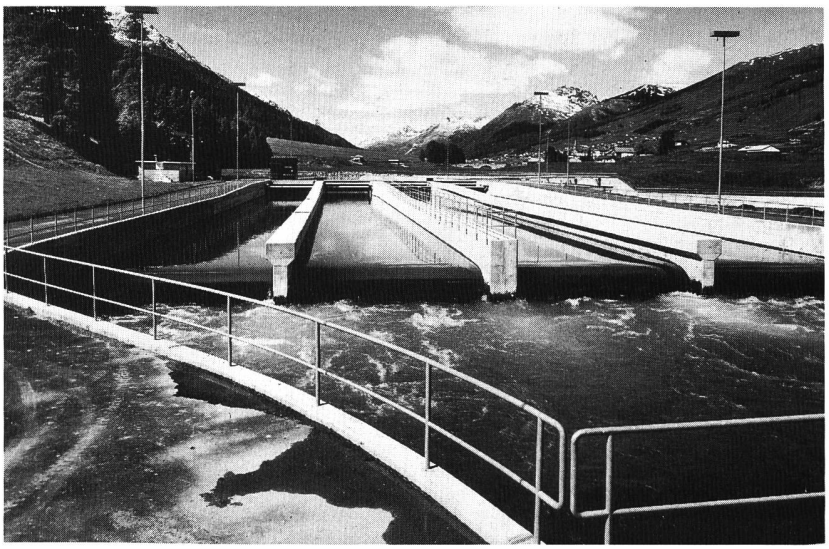


Bild 24. Unterwasserseitige Ansicht der vier Entsandungsbecken für je 8 m^3/s der Innfassung bei S-chanf/GR (Foto *Feuerstein,* Schuls/GR).

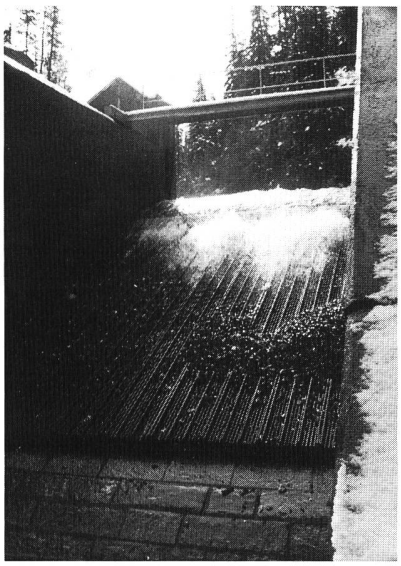


Bild 25. Grundrechenfassung Varusch bei S-chanf/GR für 5 m³/s (Foto *G. A. Töndury*, Zürich).

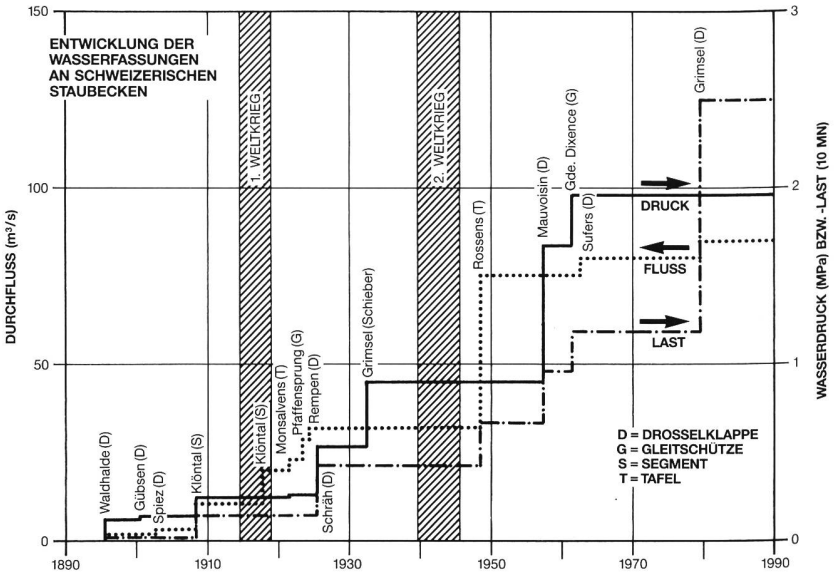


Bild 26. Entwicklung der Wasserfassungen an schweizerischen Staubekken.

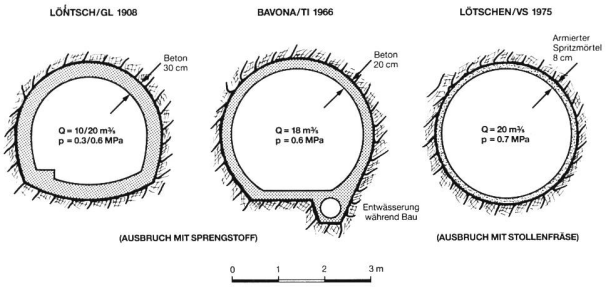


Bild 27. Querschnitte des Druckstollens des Löntschwerkes (links) und zweier moderner Stollen unter ähnlichen Gegebenheiten.

Tabelle 4. Zunahme der mittels Kanälen gefassten Betriebswassermengen in der Schweiz.

Betriebsaufnahme	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	Albbruck-Dogern/AG	66/76	Rhein	900/1100

N.B.: Ursprünglicher Ausbau/Endausbau

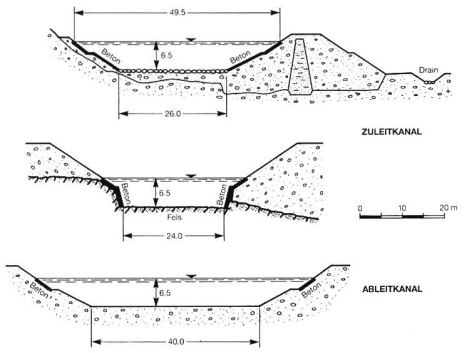


Bild 28. Typische Querschnitte der Zu- (oben und Mitte) und Ableitkanäle (unten) des 1917 fertiggestellten Aarekraftwerkes Olten-Gösgen.

ren Oberflächenwassers und der periodischen Abspülung des am Kammerboden abgelagerten Sandes. Beide Entsandungssysteme sind mit Abwandlungen und Automatisierung die üblichsten im schweizerischen Kraftwerkbau geblieben (Bild 24).

3.2 Zunahme der Betriebswassermengen der Fassungen unter Druck

Im Vergleich zu drucklosen Wasserfassungen erscheinen solche unter Druck, d.h. in Stauseen, unproblematisch. Diese liegen oft so hoch im Gebirge, dass nur wenig Geschiebe anfällt; dieses findet meist bequem im unter der Fassungshöhe ausgesparten «Totraum» Platz. Nur bei wenigen Gebirgsspeichern musste eine Spülung durch den Grundablass vorgesehen werden (Z'Mutt/VS 1964, Gebidem/VS 1967 und Ferden/VS 1975). Kleinere Staubecken wurden gelegentlich auch mit Stollen versehen, welche geschiebeführende Hochwasser um sie herum leiten (erstmals Pfaffensprung/UR 1921). Auch Geschwemmsel fällt selten in solchen Mengen an, dass die Fassung mit einem Rechen oder gar einer Rechenreinigungsmaschine ausgerüstet werden musste.

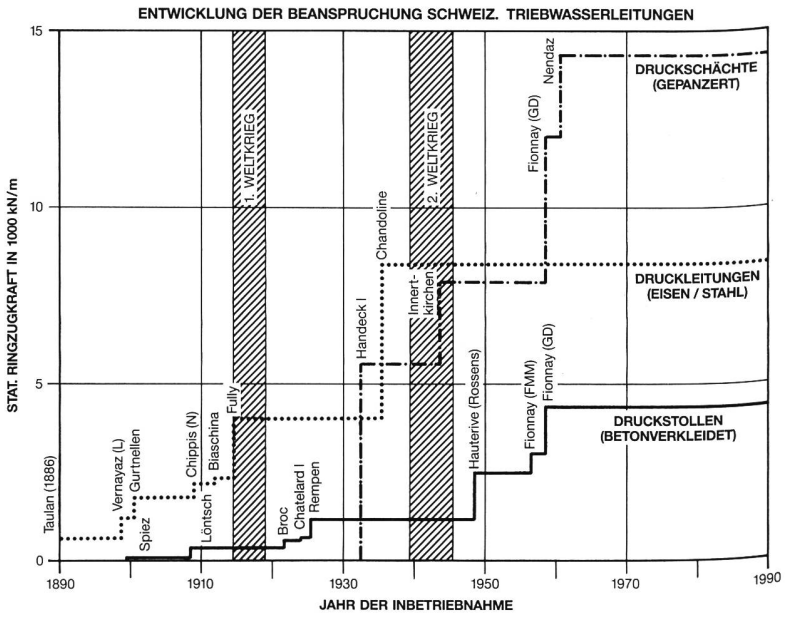


Bild 29. Entwicklung der Beanspruchung schweizerischer Triebwasserleitungen.

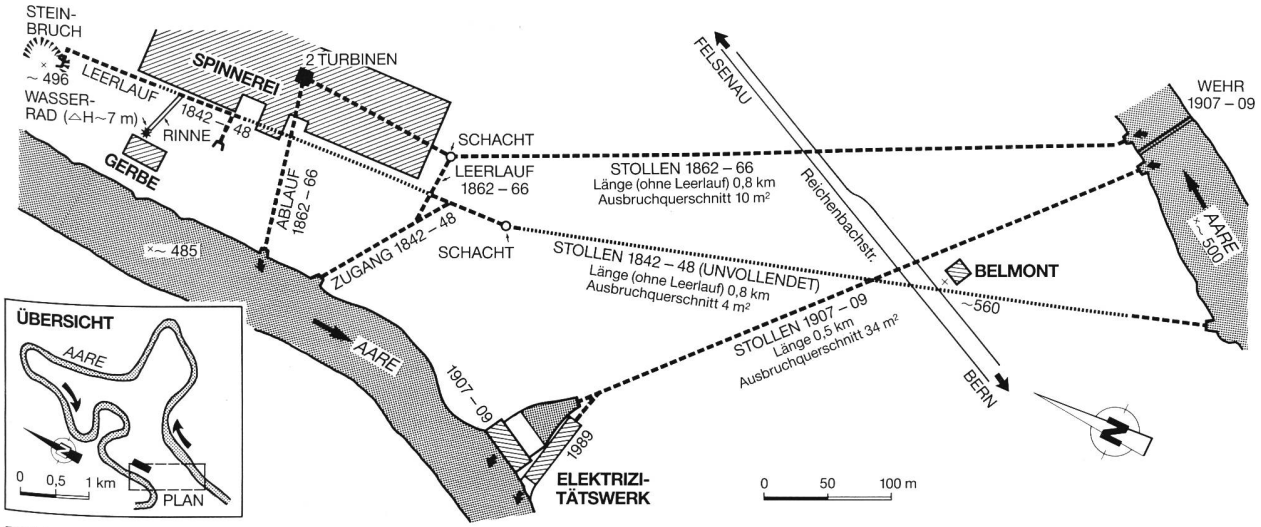
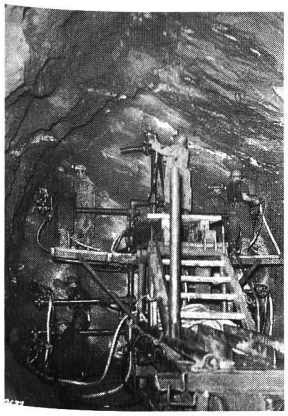


Bild 30. Stollensystem unter der Felsenau in Bern (nach alten Plänen von Gewerbepark Felsenau und Gugelmann AG, Roggwil/BE).



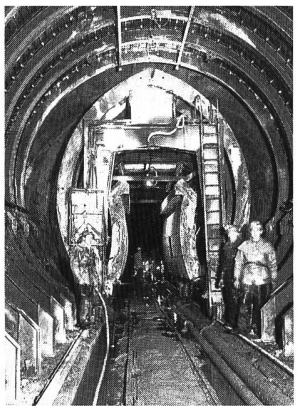


Bild 31. Mechanisierung des Stollenbaus nach dem 2. Weltkrieg: links Bohr-, rechts Schalwagen (Fotos Maggia SA, Locarno, bzw. Kraftwerke Hinterrhein AG, Thusis).

Tabelle 5. Grösste Wasserfassungen an schweizerischen Gebirgsflüssen.

Betriebs-aufnahme	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	Simmenfluh/BE	9	Simme	22
1971	Pradella/GR	288	Inn	32

[1] 1948 im Stausee von Rossens untergegangen
[2] 1978 flussaufwärts verlegt

Als Abschluss wurden nach den eigentlichen, meist leicht trompetenförmigen Einläufen von Anfang an bis heute bevorzugt Drosselklappen eingebaut, da es ja nur um einen Totalabschluss bei Revisionen oder Reparaturen in der Triebwasserleitung ging und nicht um eine Durchflussregulierung (das besorgen die Leitapparate bzw. Düsen an den Turbinen). Vereinzelt kamen auch Tafel- oder Segmentschützen zum Einsatz. Wie Bild 26 zeigt, stieg entsprechend den zunehmenden Talsperrenhöhen (siehe vorstehend) der Druck auf diese Abschlussorgane kontinuierlich von gut 0,1 MPa (Waldhalde/ZH 1895) auf fast 2 MPa (Grande Dixence/VS 1961). Im Verein mit dem gleichzeitig gesteigerten Durchfluss bzw. Querschnitt (pro Öffnung) nahm die Wasserlast auf die Abschlüsse überproportional zu und erreichte 1979 an der unterwasserseitigen Drosselklappe von 4,6 m Durchmesser des Umwälzwerkes Grimsel II 25 MN (etwa die Hälfte des heutigen Weltrekordes).

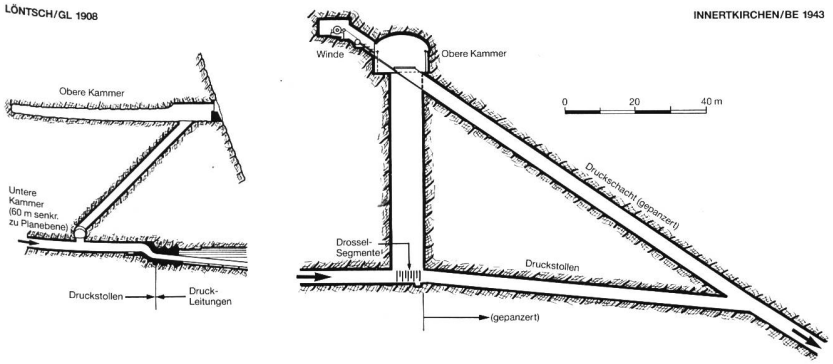


Bild 32. Gleichmassstäbliche Vertikalschnitte der Wasserschlösser der Kraftwerke Löntsch (links) und Innertkirchen (rechts).

Bild 33. Teil der rund 5,5 km langen, doppelröhrigen Druckleitung zum Kraftwerk Chandoline/VS (Foto EOS, Lausanne).

4. Triebwasserleitungen

4.1 Kanäle

In der Schweiz wurden die in Tabelle 6 aufgeführten Kanäle zur Zu- und/oder Ableitung des Betriebswassers zum und/oder vom Maschinenhaus von über 1 km Gesamtlänge gebaut. Während die Ableitungen unverkleidet blieben, wurden die Zuleitungen meist durch Betonplatten abgedichtet. Diese vermindern zudem den Fallhöhenverlust infolge Reibung. Gewöhnlich konnten die Kanäle nicht nur im Gelände ausgehoben, sondern mussten über gewisse Strecken mindestens einseitig durch Dämme abgeschlossen werden (Bild 28) [21].

Ganz in Fels ausgebrochen wurde der Kanal des Kraftwerkes Rheinfelden/AG, wobei das Aushubmaterial noch ausschliesslich mit Schubkarren abtransportiert wurde! Schon wenige Jahre später erfolgte dies beim fast ganz in Kiessand ausgehobenen Kanal des Aarekraftwerkes Beznau/AG mit provisorisch verlegten Schmalspurbahnen, auf denen kleine Dampflokomotiven und seitlich kippbare Wagen verkehrten [10]. Den Aushub, der 0,5 Mio m³ erreichte, besorgten ebenfalls dampfbetriebene Bagger. Diese Aushubmethode blieb bis nach dem Zweiten Weltkrieg in Gebrauch, als aus den USA die grossen Pneufahrzeuge eingeführt wurden, welche von Baggern beladen ihre Last nach hinten abkippen oder durch den Boden entleeren konnten. Rasch kamen auch Fahrzeuge auf, die den Boden selbst aufschürfen.

Beim Bau der Zu- und Ableitkanäle des Aarekraftwerkes Wildegg-Brugg/AG 1949–1952 kamen noch beide Methoden zum Einsatz, indem für Transporte von unter 4 km Entfernung Pneufahrzeuge und darüber Schmalspurbahnen benutzt wurden [7]. Insgesamt wurden über 2,3 Mio m³ ausgehoben und 1,1 Mio m³ davon in Dämmen eingebaut. Zusätzlich gingen über 0,6 Mio m³ in die total 7 km langen Dämme entlang beiden Flussufern im Staugebiet oberhalb des Wehres. Die letztgenannte Massnahme musste auch an mehreren Stauhaltungen von reinen Flusskraftwerken ergriffen werden. Zum Teil war sie begleitet von einer Vertiefung des Flussbettes unterhalb der Anlagen.

Tabelle 6. Schweizer Kraftwerkskanäle über 1 km Länge.

Betriebsaufnahme (-ende)	Kraftwerk (Name/Kanton)	Länge (km)	Querschnitt (m²)	Durchfluss (m³/s)	Verkleidung
1892 (–1952)	Brugg/AG	*1,01*[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	Pfläst.
1902	Beznau/AG	1,2[1]	*260*	300	Pfläst.[2]
1904 (–1970)	Wangen a.A./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	Albbruck-Dogern/AG	3,5	*550*	*900*	Beton
1945	Rupperswil-Auenstein/AG	2,5[1]	290	350	keine
1952	Wildegg-Brugg/AG	4,5[1]	320	350	Beton[3]

(Rekorde kursiv), [1] Zu- und Ableitung, [2] nur Böschungen, [3] nur Zuleitung

Tabelle 7. Bemerkenswerte Schweizer Wasserstollen.

Betriebsaufnahme (-ende)	Kraftwerk (Name/Kanton)	Innendruck (MPa)	Länge (km) Total	Zwischen Angriffen[2]	Ausbruchsquerschnitt (m²)
1895	Waldhalde/ZH	○	*2,2*	*1,1*	4
1895 (–1975)	Zufikon/AG	wenig	0,4	0,4	*20*
1896	Clées/VD	○	*3,5*	–	4
1900	Kubel/SG (Urnäschzuleitung)	○	*4,3*	*1,5*	4
1902 (–1948)	Hauterive/FR	○	*9,2*	<1,0	18
1908	Löntsch/GL	0,34	4,1	*2,6*	7
1909	Ackersand I/VS	○	*10,7*	<0,5	3
1909	Felsenau/BE	wenig	0,5	0,5	*34*
1921	Arnensee-anstich/BE, VD	0,44	4,6	*4,5*	6
1931	Lungern/OW (Melchaazuleitung)	○	6,5	*6,5*	6
1935	Chandoline/VS	0,88	*11,9*	3,5	6
1950	Lavey/VD	0,29	3,8	2,3	*60*
1953	Verbano/TI (Bavonazuleitung)	○	*23,4*	*9,6*	20
1955	Rheinau/ZH (Ableitstollen)	○	2×0,3	0,3	2×*120*
1956	Riddes/VS	0,82	14,7	*10,4*	12
1971	Pradella/GR	1,19	20,3	*11,1*	27

(Rekorde kursiv), [1] am Stollenende, [2] inkl. Zugangsstollen

4.2 Stollen

In einem so gebirgigen Land wie der Schweiz lag es nahe, Triebwasserleitungen unterirdisch zu führen bzw. führen zu müssen. Zudem verfügten die schweizerischen Baufachleute vom dem Kraftwerkbau vorausgegangenen Eisenbahnbau her über eine reiche Erfahrung im Tunnelbau (z.B. 15 km langer Gotthardtunnel 1872–1882). Einen wesentlichen Unterschied bedeutete allerdings der viel kleinere Querschnitt der Wasserstollen, der den Einsatz der für den Tunnelbau entwickelten Maschinen zum Bohren der Löcher für die Sprengladungen verunmöglichte und den Rückgriff auf die althergebrachte Handbohrmethode mit Bohrstange und Hammer erzwang. Knapp 10 m² Querschnitt hatte z.B. der wohl älteste Kraftwerkstollen der Schweiz, welcher 2 km nördlich von Bern eine Aareschleife abschnitt, um Turbinen unter der Spinnerei (heute Gewerbepark) Felsenau anzutreiben (Bild 30) [22]. Das 1862–1866 erstellte, rund 960 m lange Stollensystem benutzte Teile eines schon 1842 in Angriff genommenen, unvollendeten Durchstichs, und das Wasser floss in ihm mit freiem Spiegel (drucklos). 1909 wurde es durch den weiter südwestlich verlaufenden Stollen des Elektrizitätswerkes Felsenau ersetzt (1989 erneuert).

Auch in den ersten langen Triebwasserstollen von Ende des letzten und Anfang dieses Jahrhunderts lief das Wasser ohne Druck, doch wagte man zum Teil schon längere Strecken zwischen den Angriffspunkten (Tabelle 7). Mit der vorerwähnten Handbohrmethode betrug die mittlere Ausbruchsleistung 1,35 m/Tag in der Urnäschzuleitung zum Kraftwerk Kubel [23] und 1,05 m/Tag im Triebwasserstollen des Löntschwerkes knapp nördlich von Glarus [24]. In letzterem wurden aber bereits auch druckluftbetriebene Handbohrhämmer eingesetzt, die eine Steigerung der mittleren Ausbruchsleistung auf 4,5 m/Tag erlaubten.

Besonders bemerkenswert ist der Löntschstollen jedoch, weil in ihm, abgesehen vom kurzen, schwach eingestauten Stollen des Kraftwerkes Spiez am Thunersee (1899) [16], das Wasser erstmals unter erheblichem Druck lief (bis 0,34 MPa) (Bild 29)[1]. Um dadurch allenfalls bedingte Wasserverluste in den umgebenden Fels zu minimieren, wurde dieser auf der ganzen Stollenlänge mit einer mindestens 30 cm dicken Betonverkleidung versehen. Da diese auch die Fallhöhenverluste infolge Reibung verminderte, konnte der

[1] Die als Druckstollen konzipierte Triebwasserleitung des Kraftwerkes Obermatt (1905) bei Engelberg im Kanton Obwalden konnte nie derart betrieben werden und wurde 1962 durch eine Neuanlage ersetzt («Schweiz. Bauzeitung» 1964, S. 641). Die wie der Löntschstollen 1908 in Betrieb genommenen unteren 2,6 km des Triebwasserstollens des Walliser Kraftwerkes Martigny-Bourg sind gar unter 0,49 MPa Druck und unverkleidet, ein Wagnis, das in der Schweiz selten Nachahmung fand.

Ausbruchsquerschnitt entsprechend kleiner gehalten werden. In Anlehnung an die drucklosen Triebwasserleitungen wurde noch ein hufeisenförmiger Querschnitt gewählt, bei dem die Wände und der Boden in der unteren Stollenhälfte viel weniger gekrümmt sind als in der oberen (Bild 27). Prompt zeigten sich nach der Inbetriebnahme Risse in der Verkleidung, wie sie auch in anderen ähnlich konstruierten Stollen auftraten.

Durch Schaden klug geworden, führte der verantwortliche Konstrukteur *Carl Brodowski* (1869–1937), Bauchef der Motor (heute: Motor-Columbus) AG, Baden/AG, beim kurzen, aber unter 1,47 MPa Druck stehenden Übergangsstück vom Triebwasserstollen zur Druckleitung des Tessinkraftwerkes Biaschina (1911), 22 km nordwestlich von Bellinzona, den kreisförmigen Querschnitt ein, wie er darnach für die meisten Druckstollen üblich wurde (Bild 27) [25]. Die dem Betonring und dem umgebenden Felsen zugemutete Zugkraft infolge des Wasserdrucks stieg zwischen den zwei Weltkriegen von 420 kN/m im Löntschstollen auf rund 1200 kN/m (Bild 29). Auf mehr als das Doppelte erhöht wurde diese Kennzahl bereits 1948 bei der Erneuerung des Saanekraftwerkes Hauterive, südlich von Freiburg, welches unter der Projektleitung des Walliser Bauingenieurs *Jules F. Bruttin* (1903–1965) nicht nur mit der vorgenannten, richtungweisenden Bogenstaumauer Rossens versehen wurde, sondern auch mit bemerkenswerten Grundablässen und Wasserfassung (Bilder 20 und 26) [26].

Binnen zehn Jahren wurde danach die Ringzugkraft auf den Spitzenwert von 4400 kN/m gesteigert im unter 2,14 MPa Druck stehenden Triebwasserstollen vom Stausee Grande Dixence nach Fionnay, 23 km südlich von Sitten [27]. Das Projekt für diese immer noch manchen Schweizer Rekord haltende Anlage (Staumauer mit Grundablass und Wasserfassung, Druckstollen und -schächte sowie Kraftwerksleistungen) stammte vom Walliser Bauingenieur *Marc Lorétan* (1887–1951), Direktor der Energie de l'Ouest-Suisse (EOS) in Lausanne. Weltweit liegt heute der nicht unproblematische Rekord für die Ringzugkraft in Druckstollen bei rund 20000 kN/m, wozu noch die kurzfristigen, stark gestiegenen Beanspruchungen bei Pumpspeicherbetrieb und Netzregelung kommen [28].

In der Schweiz nahm nach dem Zweiten Weltkrieg aber auch die Länge der Stollen zu und vor allem die der Strecken zwischen den Angriffspunkten (Tabelle 7). Dies war nur möglich dank einer konsequenten Mechanisierung aller Arbeiten im Stollen durch (Bild 31):

- mehrere auf Lafetten montierte, schwere Bohrhämmer auf einem Wagen oder verschiebbaren Gerüst (vorher: von Hand oder allenfalls einer Stütze gehaltene Bohrhämmer);
- Schaufelbagger zum Aufnehmen des gesprengten Felsens und Beladen der Kippwagen von batteriebetriebenen Zügen (vorher: Schaufeln von Hand);
- Felssicherung durch in Bohrlöcher versetzte Anker, eventuell kombiniert mit Stahlnetzen und auf den Fels gespritztem Mörtel, sowie durch Stahlbogen und Bleche (vorher: Holzzimmerung, die vor der Betonierung entfernt werden musste);
- fahrbare, zusammenklappbare Metallschalungen sowie Pumpen zur Betonierung der Verkleidung (vorher: Holz- oder Metalltafelschalung).

Damit wurden die mittleren Ausbruchsleistungen auf rund 10 m/Tag gesteigert und die Gesamtbauzeiten wesentlich verkürzt.

Der vorderhand letzte Mechanisierungsschub erfolgte, als es in den USA und in Deutschland gelang, Stollenbohrmaschinen zu entwickeln, welche den Fels wegfräsen und den gefährlichen Ausbruch mittels Sprengung überflüssig machen. Nachdem 1965/66 in der Schweiz erstmals zwei Abwasserstollen mit amerikanischen Maschinen vorgetrieben worden waren, kam 1967 eine schweizerische Konstruktion auf 1,5 km des Triebwasserstollens Tinzen-Tiefencastel, 21 km südlich von Chur, zum Einsatz [29]. Beim Kraftwerk Lötschen, 33 km nordöstlich von Sitten, wurde 1973/74 erstmals die gesamte Triebwasserleitung (8 km) mit einer amerikanischen und zwei deutschen Fräsmaschinen erbohrt, wobei die mittlere Ausbruchsleistung 12 m/Tag betrug (Bild 35) [30]. Bei den wenigen nachfolgenden Kraftwerkbauten wurden die meisten Stollen ebenfalls mit Maschinen ausgebrochen, doch zeigte das neuliche Versagen aller vier eingesetzten Geräte unter schwierigen Felsverhältnissen bei den Kraftwerken Ilanz, 30 km südwestlich von Chur, die Grenzen der noch jungen Technik auf.

4.3 Druckleitungen und -schächte

Bei den schweizerischen Hochdruckkraftwerken kam fast durchs Band die «klassische» Auslegung zur Anwendung mit schwach geneigtem Stollen bis über das Maschinenhaus und Konzentration der Fallhöhe in einer Druckleitung zu diesem hinab. Zwischen den beiden Teilen der Triebwasserleitung ist ein Puffer notwendig, um die bei Zu- und Abschaltungen des Kraftwerkes entstehenden Druckschwankungen im Betriebswasser aufzufangen. Diese meist unterirdisch angeordneten «Wasserschlösser» waren zu Beginn einfache Schächte, eventuell mit einer Verengung an ihrem unteren Ende zur Drosselung des Wasserein- bzw. -austritts, wie z.B. beim Kraftwerk Spiez am Thunersee (1899) [16]. Doch schon beim ebenfalls vorerwähnten Kraftwerk Löntsch (1908) wurden oben und unten Expansionskammern an den Schacht angeschlossen, um im Schacht die Wasserspiegelschwankungen zu begrenzen (Bild 32) [24]. In Zusammenhang mit dem Kraftwerk Innertkirchen I (1943), 66 km südöstlich von Bern, das als zweites in der Schweiz eine unterirdische Druckleitung (= Druckschacht, siehe nachstehend) erhielt, wurde durch Verlängerung derselben bis zur oberen Expansionskammer, in die ein Vertikalschacht vom Druckstollen her mündet, ein Wasserschlosstyp entwickelt, der ohne untere Expansionskammer auskommt, aber einer Drosselung bedarf (Bild 32) [31]. Vor allem die letztgenannte Vorkehrung ist unter Hydraulikern und Turbinenkonstrukteuren umstritten, und je nach deren Standpunkt wurden in der Folge Zweikammer-Wasserschlösser oder solche vom Typ «Innertkirchen» angewandt.

Eine Druckleitung besteht aus einer oder mehreren parallelen Röhren, die auf gemauerten oder betonierten Sockeln ruhen und meist in grösseren Abständen bzw. an Krümmungen durch Verankerungsblöcke festgehalten werden (Bild 33). Vor allem in neuerer Zeit wurden sie oft in wieder zugeschüttete Gräben verlegt. Dabei erfolgte die Montage von unten nach oben meist mittels einer vorgängig erstellten Standseilbahn, die gewöhnlich für den Betrieb beibehalten und gelegentlich auch Dritten (z.B. Touristen) zugänglich gemacht wurde. Die Verbindung der einzelnen Rohre wie auch deren Herstellung aus gebogenen Stahlblechen erfolgte anfänglich durch Nieten, ab Beginn des 20. Jahrhunderts mittels Schweissung.

Entsprechend den Fortschritten der Metallurgie konnten den Röhren fortlaufend höhere Wasserdrücke bzw. Ringzugkräfte zugemutet werden (Bild 29). Den diesbezüglichen Schweizer Rekord hält mit über 17 MPa bzw. 8400 kN/m immer noch die 5,5 km lange, doppelröhrige Druckleitung des Kraftwerkes Chandoline, 2 km südöstlich von Sitten, welches mit seiner vorerwähnten Pfeilerstaumauer Dixence

Bild 34. Dr. h.c. *Arnold Kaech* (1881–1965).

1930–1935 unter Leitung des obgenannten *Lorétan* entstand [32]. Weltweit erreicht die maximale Ringzugkraft heute Werte von über 20000 kN/m, wobei neben der Stahlqualität die verschweissbare Blechstärke die Begrenzung darstellt. Die Entwicklung der schweizerischen Druckleitungen bezüglich Länge und Durchmesser wird in Tabelle 8 gezeigt.

Ausgehend von einigen wenigen schwedischen, italienischen und österreichischen Vorbildern, liess *Kaech* (Bild 34) beim bereits erwähnten Kraftwerkbau im Oberhasli, 80 km südöstlich von Bern, 1932 zum erstenmal in der Schweiz die Druckleitung in einem schrägen Felsschacht einbetonieren. Dies erlaubte nicht nur schwierigen Geländeverhältnissen und der Steinschlag- oder Lawinengefahr auszuweichen, sondern auch einen Teil des Wasserdrucks, wie in einem Druckstollen, an den umgebenden Fels abzugeben. Um die letztgenannte Frage drehten sich in der Folge die meisten theoretischen Untersuchungen sowie die oft kostspieligen Feldversuche, bis man sich nach einigen spektakulären Schadenfällen inne wurde, dass die Panzerung vor allem durch den äusseren Wasserdruck im Fels bei (z.B. für Revisionen) geleertem Schacht gefährdet ist. Meist wurde sie durch entsprechende Mehrdicke einbeulsicher gestaltet.

Wie bei den vorbehandelten Druckstollen wurde der Schweizer Rekord bezüglich Ringzugkraft in Druckschächten bereits 1960 beim Grande-Dixence-Projekt erreicht (Bild 29) [27]. Der Wasserdruck wurde 1963 beim Kraftwerk Tierfehd, 19 km südlich von Glarus, noch leicht auf 10,2 MPa gesteigert. Die Entwicklung bezüglich Länge und Durchmesser ist in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 8. Schweizer Rekorddruckleitungen.

Betriebsaufnahme (-ende)	Kraftwerk (Name/Kanton)	Anzahl	Röhren Länge (m)	Durchmesser (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 (–48)	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*	0,99
1960	Nendaz/VS	1	849	*3,10*

N.B.: Durchmesser am untern Leitungsende (Rekorde kursiv)

Tabelle 9. Schweizer Rekorddruckschächte.

Betriebsaufnahme	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/GR	1073	*3,90*
1962	Bärenburg/GR	640	*4,00*
1964	Stalden/VS	*2233*	2,10

N.B.: Durchmesser am untern Schachtende (Rekorde kursiv)

Die Stollenbohrmaschinen wurden zuerst beim Bau von Druckschächten eingeführt, bevor man sie bei Druckstollen einsetzte (abgesehen vom kurzen Versuch im Triebwasserstollen Tinzen-Tiefencastel). Die Arbeit in einem Druckschacht war ja auch besonders schwer, denn die Schachtneigung beträgt 80 bis 90%, um dem gesprengten Felsen das Abgleiten unter Schwerkraft zu erlauben. Als erster auf der Welt wurde 1968/69 der 1140 m lange, geneigte Teil des Druckschachtes zur Zentrale Châtelard der Kraftwerkgruppe Emosson, 38 km südwestlich von Sitten, mit einer deutschen Maschine erbohrt (Bild 35) [34]. Diesem Beispiel folgten, wie erwähnt, die meisten der wenigen späteren Kraftwerkbauten.

5. Maschinenhäuser

Am Ende von Druckleitung oder -schacht (bzw. bei Flusskraftwerken nach Durchströmen des Rechens) tritt das Betriebswasser ins Maschinenhaus ein, wo seine potentielle Energie in Elektrizität umgewandelt wird und das vorwiegend die Domäne der Maschinen- und Elektroingenieure ist. Baufachleute liefern dazu noch die Fundamente und die Hülle (Bild 36). Eine zunehmend häufigere Lösung für letztere war der Fels, d.h. die unterirdische Anordnung von Turbinen und Generatoren sowie meist auch der Transformatoren (zur Erzeugung der für die Fernübertragung nötigen Stromspannung).

Wie bei den Druckschächten von wenigen Präzedenzfällen ausgehend, war es wiederum *Kaech,* der bei der Zentrale Innertkirchen der Kraftwerke Oberhasli den Bau 1940–43 des ersten unterirdischen Maschinenhauses der Schweiz

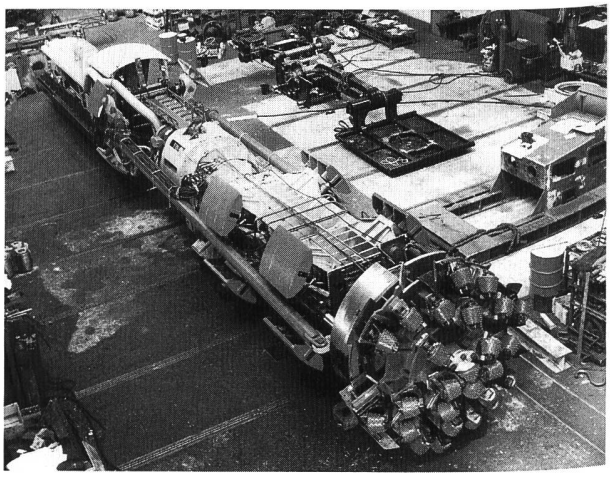


Bild 35. Werkstattaufnahme der Fräse für den Ausbruch des Druckschachtes Corbes des Kraftwerkes Emosson (Foto A. Wirth & Co. KG, Erkelenz/BRD).

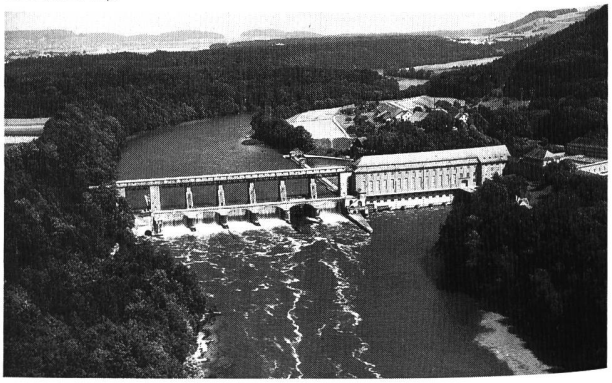
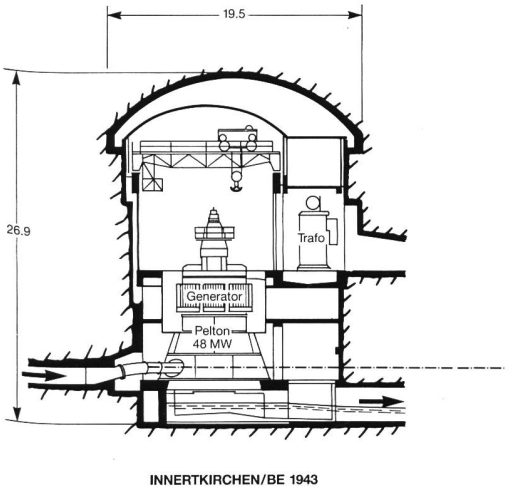


Bild 36. Luftaufnahme des von den renommierten Architekten Gebr. *Pfister,* Zürich, gestalteten, 1920 in Betrieb genommenen Rheinkraftwerkes Eglisau (33 MW), 24 km nördlich von Zürich (Foto NOK, Baden).

veranlasste [31]. Fünf vertikalachsige 48-MW-Stromerzeugungseinheiten sowie die Transformatoren sind in einer schmalen, hohen Kaverne von 45000 m³ Ausbruchsvolumen untergebracht. Die Sicherheitsschieber vor den Düsen der Peltonturbinen wurden in einem gesonderten Parallelstollen installiert (Bild 37). Für die 47-MW-Zentrale Peccia, 41 km nordwestlich von Bellinzona, und die zahlreichen dazumal (1955) in Bau oder unmittelbar davor stehenden Maschinenhäuser der Kraftwerkgruppen Maggia und Blenio (beide im Tessin) wurde dann ein Kavernentyp entwickelt, der mit einem Gewölbe sämtliche elektromechanischen Einrichtungen überspannt (Bild 37) [35]. Dadurch stieg die Spannweite von knapp 20 m in Innertkirchen auf 27 m in Peccia, gleichzeitig verminderte sich die Kavernenhöhe. In der Schweiz wurden fast alle Kavernengewölbe mit Beton verkleidet, und nur im waadtländischen Veytaux (1971) wurde die im Ausland propagierte, nicht notwendigerweise billigere und sicher nicht dauerhaftere Gewölbesicherung mit in Bohrlöchern versetzten Ankern benutzt [36].

Beide beschriebenen Kavernentypen wurden parallel weiter angewandt für die, wie angetönt, steigende Anzahl unterirdischer Maschinenhäuser. Seit Innertkirchen beherbergen diese rund die Hälfte der neuerstellten Kraftwerksleistung, d. h. gut 4800 MW in etwa 40 Kavernen. Deren Ausbruchvolumen erreichte Spitzenwerte von fast 80000 m³ (1962 in Ferrera/GR und beim vorgenannten Veytaux). Hauptgründe für die unterirdische Anordnung von Maschinenhäusern waren Platzmangel in den oft engen Gebirgstälern, Steinschlag- oder Lawinengefahr, sicherheitspolitische Überlegungen und die grosse Freiheit in der räumlichen Disposition der Gesamtanlage. Nicht zuletzt waren es oft auch landschaftliche Rücksichten, die zur Kavernenlösung führten.

Schliesslich noch ein kurzer Blick auf die Entwicklung der elektromechanischen Ausrüstung der Kraftwerke in den letzten hundert Jahren, die mindestens so rasant verlief wie die der hier behandelten wasserbaulichen Anlageteile. Dabei ist interessant festzustellen, dass die Gesamtleistung der Maschinenhäuser bereits 1960 ihr Maximum erreichte (Bild 38 oben). Wohlgemerkt in der Schweiz, denn weltweit liegt der Rekord inzwischen bei 12600 MW oder 32mal mehr (Itaipú an der brasilianisch-paraguayischen Grenze)! Bei



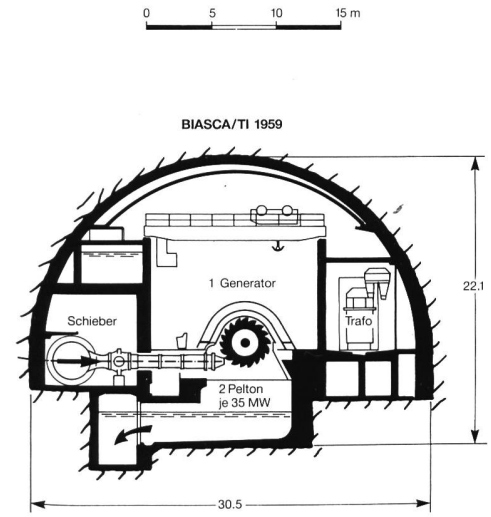
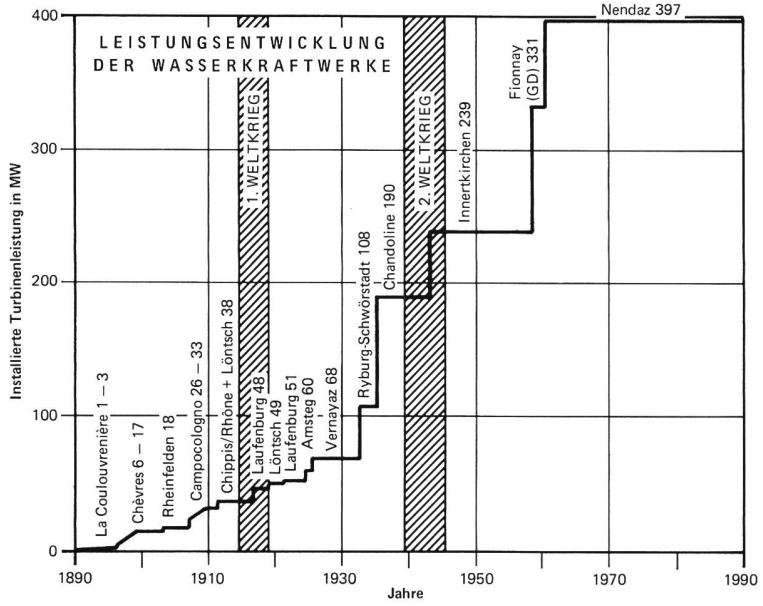


Bild 37. Querschnitte der Maschinenkavernen Innertkirchen (oben) und Biasca (unten).



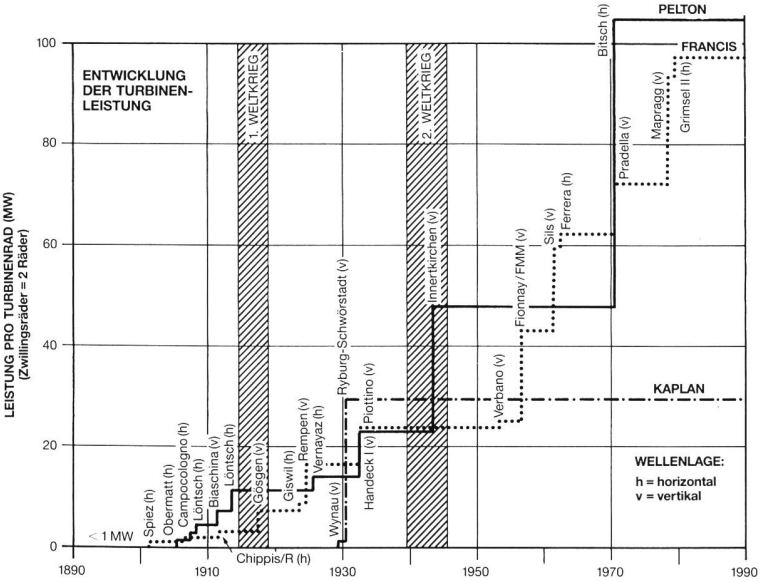


Bild 38. Entwicklung der Gesamtleistung von Wasserkraftwerken in der Schweiz (oben) und der Leistung pro Rad der verschiedenen Turbinentypen (unten).

Tabelle 10. Schweizer Pumpspeicheranlagen 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)[2]	Schaffhausen/SH	2	2	1,0
1926	Rempen/SZ	66	15	0,2
1942	Oberems/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
1957	Zervreila/GR	20	6	0,3
1958	Motec/VS	69	32	0,5
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
[2] Umbau und Erneuerung geplant
*auch mehrtägiger Umwälzbetrieb möglich

den Leistungen pro Turbine hingegen hielt die Zunahme auch in der Schweiz bis vor etwa zehn Jahren an (Bild 38 unten). Das Maximum von rund 100 MW/Rad ist international allerdings auch längst überholt, wobei jedoch festzuhalten ist, dass die schweizerische Maschinenindustrie an der weltweiten Entwicklung weiterhin massgeblich teilnimmt. 100 MW Leistung entsprechen übrigens rund 20000 Wasserrädern, d.h. doppelt so vielen, wie es in der Schweiz vor Einführung von Turbinen etwa gab [1].

Einen besonderen Aspekt der elektromechanischen Ausrüstung von Wasserkraftwerken stellt die zunehmende Installation von Speicherpumpen dar, welche es erlauben, in Zeiten schwachen Stromkonsums Wasser von einem Unterbecken in ein Oberbecken zu fördern, um es dann zu Spitzenzeiten zu turbinieren. Das erfolgt wohlgemerkt über dieselbe Triebwasserleitung. Obschon etwa ein Drittel der Energie verlorengeht, ist dies wegen des Unterschieds der Produktionskosten zwischen Schwachlast- und Spitzenstrom oft wirtschaftlich interessant. Zudem stellt Pumpspeicherung die einzige Möglichkeit zur Lagerung von Elektrizität in grösseren Mengen dar. Erste derartige Anlagen entstanden in der Schweiz schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts anstelle der damals meistenorts zur Spitzendeckung eingesetzten Dampfmaschinen. Deren Hauptdaten sowie diejenigen späterer Pumpspeicheranlagen sind in Tabelle 10 zusammengestellt.

Viele der Speicherpumpen waren, wie die nicht aufgeführten reinen Zuleitungswerke zu Stauseen (z.B. bei Grande Dixence vier von 186 MW Gesamtleistung), ursprünglich für die Speicherung von Sommerabflüssen für den Winter gedacht, können aber auch zur täglichen Umwälzung von Schwachlast- auf Spitzenstrom verwendet werden. Besonderes Interesse gewannen in letzter Zeit Werke, die eine solche Umwälzung über mehrere Tage (z.B. Wochenenden oder bei Ausfall eines Kernkraftwerkes) ermöglichen. Typische Vertreter der letztgenannten Art von Pumpspeicherwerken sind die Anlagen Veytaux, 25 km südöstlich von Lausanne, und Grimsel II der Kraftwerke Oberhasli [37]. Die Gesamtleistung der Speicherpumpen in der Schweiz beträgt heute gut 1300 MW oder 9% der Leistung aller Elektrizitätserzeugungsanlagen (inkl. Kernkraftwerke).

Adresse des Autors: Dipl. Ing. ETHZ *Niklaus Schnitter,* Fleinerweg 4, CH-8044 Zürich.

Literaturverzeichnis

[1] *N. Schnitter:* Entwicklung der Wasserkraftnutzung in der Schweiz im 19. Jahrhundert. «wasser, energie, luft» 1989, S. 145–153.
[2] *F. Chavaz:* Die Regulierung der Seen im Einzugsgebiet der Reuss. «Wasser- und Energiewirtschaft» 1958, S. 209–225.
[3] *H. Bertschi:* Die Zürichseeregulierung. «Wasser- und Energiewirtschaft» 1952, S. 191–206.
[4] *P. Giacasso:* Utilisation des forces motrices du Rhône aux 18e et 19e siècles. L'histoire de la protection contre les crues et de l'utilisation des forces hydrauliques en Suisse. Pro Aqua, Bâle 1983, S. 7.1–7.10.
[5] *E. Stambach:* Über die Entwicklung der schweizerischen Niederdruck-Wasserkraftanlagen in den letzten 50 Jahren. «Schweiz. Bauzeitung» 1944 (Bd. 124), S. 321–325 und 336–340.
[6] *A. Ludin:* Die Wasserkräfte. J. Springer, Berlin 1913 (S. 202–203, 834–836 und 1241–1242).
[7] Nordostschweizerische Kraftwerke AG: Das Kraftwerk Wildegg-Brugg. «Schweiz. Bauzeitung» 1956, Nr. 4–12.
[8] *P. C. Erbiste:* Hydraulic Gates, the State-of-the-Art. «Int. Water Power and Dam Construction» April 1981, p. 43–48.
[9] A. Aegerter & Dr. O. Bosshardt AG: Das Kraftwerk Birsfelden. «Wasser- und Energiewirtschaft» 1954, S. 165–176.
[10] Elektrizitätswerk Beznau an der Aare. «Schweiz. Bauzeitung» 1907 (Bd. 49), Nr. 6–13.
[11] *E. Zurfluh:* Der Neubau des Stauwehres Beznau. «wasser, energie, luft» 1978, S. 78–81 und *P. Lier* und *H.-P. Müller:* Strömungsbedingte Schäden an einem Stauwehr. «wasser, energie, luft» 1989, S. 33–38.
[12] *N. Schnitter:* Talsperren der Schweiz; die Werke bis Ende des 19. Jahrhunderts. «Schweiz. Ing. und Arch.» 1987, S. 1328–1333.
[13] *N. Schnitter:* Geschichte des Talsperrenbaus in der Schweiz. «wasser, energie, luft» 1985, S. 185–192 (français/english in: Barrages suisses/Swiss Dams. Com. Nat. Suisse des Grands Barrages, Zürich, 1985).
[14] *R. Glossop:* The Invention and Development of Injection Processes. «Géotechnique» 1960/61, p. 91–100 and 255–279.
[15] *R. Biedermann:* Zur Hochwassersicherheit von Talsperren. «wasser, energie, luft» 1986, S. 137–142.
[16] Wasserkraftanlagen der Vereinigten Kander- und Hagnekwerke AG in Bern; das Elektrizitätswerk Spiez. «Schweiz. Bauzeitung» 1908 (Bd. 52), Nr. 11ff.
[17] *A. Sarrasin:* Notes sur les barrages à arches multiples. «Schweiz. Bauzeitung» 1939 (Bd. 113), S. 231–235.
[18] Zum Vollausbau des Lungernsee-Kraftwerkes. «Schweiz. Bauzeitung» 1939 (Bd. 114), S. 243–245.
[19] *P. Schmidhauser:* Les travaux d'amenée dans la Grande Eau des eaux du lac d'Arnon. «Bull. techn. Suisse rom.» 1923, p. 102–228.
[20] *E. Meyer-Peter:* Die Entwicklung der baulichen Bestandteile der hydro-elektrischen Werke. «Schweiz. Bauzeitung» 1927 (Bd. 89), S. 107–114.
[21] Die Wasserkraftanlage Gösgen an der Aare. «Schweiz. Bauzeitung» 1920 (Bd. 75), Nr. 1ff.
[22] *M. Marti:* Zur Geschichte (des Kraftwerks Felsenau). «wasser, energie, luft» 1989, S. 278–282.
[23] *L. Kürsteiner:* Das Elektrizitätswerk Kubel bei St. Gallen. «Schweiz. Bauzeitung» 1904 (Bd. 43), Nr. 14ff.
[24] *J. Ehrensperger:* Elektrizitätswerk am Löntsch. «Schweiz. Bauzeitung» 1910 (Bd. 55 und 56).
[25] Die Wasserkraftanlagen Biaschina und Ticinetto. «Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen» 1913, Nr. 1–4.
[26] *J. F. Bruttin:* L'aménagement hydroélectrique de Rossens-Hauterive après deux ans d'expérience. «Bull. tech. Suisse romande» 1951, p. 69–85.
[27] Grande Dixence. «Water Power» 1963, Nr. 4 und 5.
[28] *A. Schleiss:* Neuzeitliche Ausbildung von Druckstollen. «wasser, energie, luft» 1986, S. 17–24.
[29] *E. Lauber* und *H. W. Brodbeck:* Erfolgreicher Einsatz der Habegger-Tunnelfräsmaschine im Hartgestein. «Schweiz. Bauzeitung» 1968, S. 917–924.
[30] *F. Aemmer:* Mechanische Stollenvortriebe beim Bau des Kraftwerkes Lötschen. «Mitt. Schweiz. Gesellsch. Boden- und Felsmech.» 1975, Nr. 91.
[31] *W. Jegher:* Das Kraftwerk Innertkirchen: «Schweiz. Bauzeitung» 1942 (Bd. 120), Nr. 3ff.
[32] EOS 1919–1944. Energie de l'Ouest Suisse, Lausanne 1944.
[33] *W. Jahn:* Denkschrift über den Bau des Kraftwerkes Handeck. Kraftwerke Oberhasli, Innertkirchen 1932.
[34] *F. Aemmer:* Einsatz einer Tunnelbohrmaschine in Le Châtelard beim Bau des Druckschachtes Corbes der Kraftwerkanlage Emosson. «Schweiz. Bauzeitung» 1970, S. 267–273.
[35] *H. Lüthi* und *H. Fankhauser:* Beitrag zur Entwicklung von Kavernenbauten. «Wasser- und Energiewirtschaft» 1967, S. 345–356.
[36] *O. J. Rescher:* Soutènement de la centrale en caverne de Veytaux par tirants en rocher et béton projeté. «Bull. tech. Suisse romande» 1968, p. 249–260.
[37] *F. Zingg:* Der Weiterausbau der Kraftwerke Oberhasli. «Schweiz. Bauzeitung» 1974, S. 1002–1005.