

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 69 (1977)
Heft: 10

Artikel: Erneuerung alter Wasserkraftwerke
Autor: Nüssli, Walter / Jacobsen, Sidney / Bohun, Vladimir
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941501>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.02.2026

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

Walter Nüssli, Sidney Jacobsen, Vladimir Bohun

Résumé: Rénovation de l'aménagements hydro-électriques

Par le renouvellement des centrales hydrauliques agées en Suisse, on pourrait gagner une production annuelle d'énergie supplémentaire d'environ 2000 GWh.

Dans de nombreux cas, ce qui incite au renouvellement d'une centrale n'est pas en premier lieu l'appétit de l'augmentation de la puissance et de la production, mais avant tout le souci de maintenir la sécurité de service des conduites forcées, des installations du barrage et des installations électromécaniques de la centrale, ainsi que de solutionner les difficultés de service et autres problèmes.

L'article traite en détail des arguments possibles pour un renouvellement de centrale et illustre au moyen de quel-

ques exemples réalisés avec succès les différents degrés de renouvellement possibles: remplacement d'une installation existante par une nouvelle; transformation ou agrandissement d'une installation existante tout en continuant d'utiliser des éléments importants de la dite installation, remplacement partiel ou en grande partie des éléments d'une installation; automatisation des groupes, des installations du barrage et des systèmes auxiliaires; mise hors service et liquidation de la centrale.

L'article se termine par une considération des aspects économiques spécifiques des renouvellements de centrales.

Einleitung

Die jüngste Entwicklung auf dem Energiesektor verleiht den Anstrengungen um Erneuerung und Verbesserung älterer Wasserkraftwerke neue Impulse.

Wenn auch Leistung und Produktion der einzelnen in der Pionierzeit der Elektrizitätswirtschaft erstellten Anlagen zum Teil recht klein ist, so zeigt doch eine Erhebung, dass allein in der Schweiz durch Erneuerung älterer Wasserkraftwerke bis zum Jahre 2000 eine zusätzliche jährliche Energieproduktion von immerhin 1500 bis 2000 GWh gewonnen werden kann [8] (Bild 1).

Es ist nun aber keineswegs so, dass sich für eine Kraftwerk anlage ein bestimmtes Betriebsalter definieren lässt, nach dem es automatisch erneuerungsbedürftig wird. Vielmehr muss jede Erneuerung sorgfältig und objektiv untersucht werden, um die für den Besitzer technisch, betrieblich und wirtschaftlich optimale Lösung zu finden.

Dabei kann es dem heutigen Ingenieur zuweilen recht schwerfallen, die Konzeption eines vor 60 Jahren erbauten Kraftwerkes zu verbessern und mit modernen Maschinensätzen die Leistung der oft museumswürdigen Turbinen und Generatoren massgeblich zu übertreffen, womit an dieser Stelle den Leistungen unserer Vorfäder und Erbauer dieser Pionierwerke uneingeschränkt Hochachtung gezollt sei.

Die gesuchten Leistungs- und Produktionsreserven liegen meist eher in den nur teilweise genutzten Wassermengen und Fallhöhen, d. h. im niedrigen, der damaligen Zeit angepassten Ausbaugrad der Anlagen und in den geringen Speichermöglichkeiten, die für die älteren Anlagen kennzeichnend sind.

Die mannigfaltigen Aspekte und Probleme im Zusammenhang mit Erneuerungsstudien sollen nachstehend kurz beleuchtet und anhand einer Auswahl von ausgeführten Arbeiten Lösungsmöglichkeiten und Ergebnisse dargestellt werden.

1. Argumente für eine Erneuerung

Massgebend für eine Kraftwerkerneuerung wird immer sein, ob sie wirtschaftlich gestaltet werden kann. Die Wirtschaftlichkeit hängt dabei meistens in entscheidender Weise davon ab, ob und wieweit Fallhöhen und/oder Ausbauwassermengen und damit Leistung und Produktion erhöht oder durch Schaffung von Speichervolumen die gelieferte Energie aufgewertet werden kann.

Paradoxe Weise ist es aber in vielen Fällen nicht der Anreiz einer erhöhten Leistung und Produktion, welcher An-

lass zur Erneuerung gibt, sondern es ist weit eher die Sorge um die Erhaltung der Betriebssicherheit und -kontinuität, oder es sind betriebliche Erschwerisse, die Sanierungspläne wachrufen. Dabei stehen materialtechnische Gründe bei Druckleitungen, Abschlussorganen, Wehranlagen und Maschinengruppen im Vordergrund. Betrieblich erforderliche Sanierungen beziehen sich eher auf Wehranlagen, Maschinengruppen und elektrische Einrichtungen.

1.1 Wann wird eine Druckleitung erneuerungsbedürftig?

Während die ersten geschlossenen Druckleitungen durchwegs genietet wurden, kamen nach der Jahrhundertwende wassergas- oder feuergeschweißte Rohre zum Einsatz, die auf Montage verflanscht oder zusammengenietet wurden.

Das autogene Schweißen kam um 1910 auf und wurde später durch die noch heute übliche Lichtbogenschweißung verdrängt.

Seit Mitte der zwanziger Jahre ist praktisch keine Druckleitung mehr genietet worden, und seit Anfang der dreißiger Jahre wurden fast ausnahmslos lichtbogengeschweißte Rohre verwendet.

Für die Sicherheit einer Druckleitung ist nicht die Materialfestigkeit, sondern seine Sprödbruchneigung ausschlaggebend. Die alten Rohrleitungen sind oft stark sprödbruch-anfällig, hauptsächlich unter schlagartiger oder dynami-

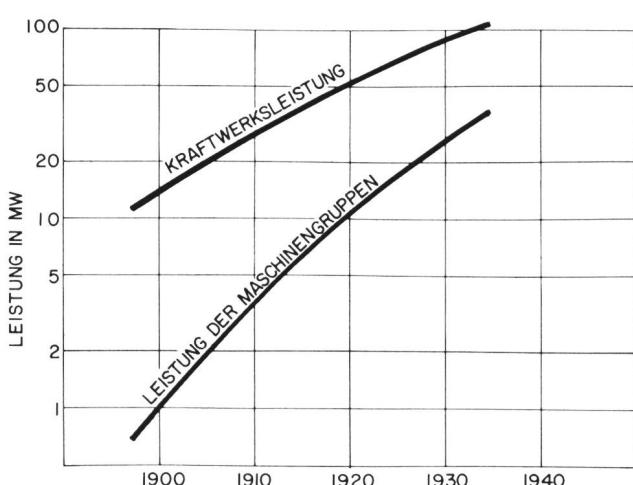


Bild 1. Entwicklung der hydraulischen Kraftwerks- und Maschineneinheitsleistungen im Zeitraum von 1900 bis 1930 (Schweiz).

scher Belastung (Druckstoss). Die Anfälligkeit nimmt mit den Jahren zu (Alterung). Besonders gefährdet sind ältere geschweißte Druckleitungen, nicht nur weil die damaligen Schweißungen oft zahlreiche Trennungen, Hohlräume und Einschlüsse aufweisen, sondern weil die nicht weit entwickelte Schweißtechnik die Sprödbruchneigung des Schweißgutes und des Nachbarmaterials stark vergrösserte. Da die Niettechnik (Bohren der Löcher) die Materialeigenschaften kaum ungünstig beeinflusst hat, sind die genieteten Rohrleitungen wesentlich betriebssicherer als die alten, geschweißten Leitungen.

Seit einigen Jahren beachtet man das Sicherheitsproblem der alten Druckleitungen vermehrt. Das Eidgenössische Amt für Strassen- und Flussbau hat einen Experten ernannt, der in Zusammenarbeit mit der EMPA den Zustand der alten Anlagen feststellen und Folgemassnahmen vorschlagen soll. Sämtliche geschweißte Druckleitungen, die in den Jahren 1925 bis 1930 erstellt wurden, können ein Sicherheitsrisiko darstellen.

Obwohl früher mit einfachen Rostschutzmethoden gearbeitet wurde (einfache Bitumenanstriche), sind kaum Fälle bekannt, bei denen die Anrostung so stark war, dass die Sicherheit der Anlage aus diesem Grund nennenswert eingeblösst hatte.

1.2 Wehranlagen

Die Schützenkonstruktionen, die man als bewegliche Tragkonstruktionen für grosse Lasten definieren kann, haben heute hinsichtlich Funktion, Fertigungstechnik und Perfektion einen hohen Stand erreicht. Aber auch die über 50 Jahre alten Verschlüsse mussten schon Betriebsbedingungen erfüllen, die eine recht genaue Fabrikation erforderten. Dies muss im Zusammenhang mit den meist sehr voluminösen und kräftig gebauten Schützenkörpern gesehen werden, um zu verstehen, warum die Schützenbauer so lange davor zurückschreckten, ihre Konstruktionen zu schweißen. Gerade die Konstrukteure der grossen Stahlwasserbaufirmen hielten hier wohlweislich zurück, weil sie um die Folgen wussten, die sich einstellen könnten: Verzug, Verwerfungen, die bei der Grösse der Objekte nicht mehr gutzumachen sind.

Die alten Wehrschrüten, ob es sich nun um einfache Tafelschrüten, zweiteilige Hub- oder Hubhakenschüten, ein- oder zweiteilige Segmentschrüten oder Sektorschüten handelt, sind Nietkonstruktionen. Sie stellen, wenn sie richtig unterhalten wurden, im allgemeinen keine Sicherheitsprobleme dar.

Eine Wehranlage wird in den meisten Fällen erneuert, weil weiter aufgestaut werden soll, weil neue Schüten mit moderner Steuerung und Abflussregulierung einen Gewinn an Produktivität bringen oder weil die bisherige Schützenbedienung nicht mehr zumutbar erscheint oder Betriebspersonal eingespart werden kann.

1.3 Maschinelle und elektrische Kraftwerkseinrichtungen

Turbinen, Abschlussorgane und Einlaufschüten sind normalerweise die ältesten Einrichtungen, die in Kraftwerkseinrichtungen anzutreffen sind. In verschiedenen Anlagen versehen noch Turbinen den Betrieb, die um die Jahrhundertwende gebaut wurden. Bei den langsam drehenden Einheiten in Niederdruckanlagen besteht dabei selbst bei geringerer Materialqualität auch heute keine Gefahr eines Maschinenschadens. Dies vor allem dank der im allgemeinen geringen spezifischen Materialbelastung von Laufrad, Welle und Lagerung sowie dank der konservativen und kavitations-sicheren Aufstellung.

Kritisch kann die Lage bei alten Peltonräderwerden, die, durch Erosionserscheinungen geschwächt, derart gefährdet sind, dass ganze Schaufelstücke ausbrechen oder Schaufeln fortfliegen könnten. Bei den Turbinen sind es jedoch meistens die Reguliereinrichtungen, die Abschluss- und Sicherheitsorgane und Getriebe, die selbst bei sorgfältigstem Unterhalt ihre Funktionen nicht mehr mit der erforderlichen Zuverlässigkeit erfüllen und deren Reparatur weder zweckmäßig noch lohnend ist.

Die Lebensdauer von Generatoren ist ebenfalls erstaunlich, und auch davon sind noch viele wahre Museumsstücke aus der Zeit nach der Jahrhundertwende in Betrieb. Allerdings mussten diese meistens nach einer Betriebszeit von 30 bis 40 Jahren neu gewickelt werden, da die Isolationstechnik noch nicht sehr fortgeschritten war.

Die elektrischen Einrichtungen einer Kraftwerkseinrichtung nehmen in bezug auf ihre Erneuerungswürdigkeit einen speziellen Platz ein. Mit Ausnahme der Transformatoren mussten die Schaltanlagen, Schutz- und Reguliereinrichtungen laufend den betrieblichen Bedürfnissen (oft auch Spannungsänderungen) angepasst werden, was im Laufe der Zeit in kleinen Schritten durch das werkseigene Fachpersonal im Rahmen der Unterhaltsbudgets geschah. Mangelnde Uebersichtlichkeit und Sicherheit verlangt aber oft auch eine umfassende Erneuerung.

Generell lässt sich die Betriebssicherheit einer Maschinengruppe sowie der elektrischen Anlageteile durch nachträglichen Einbau von modernen Betriebsüberwachungsapparaten verbessern. Doch sind hier Grenzen gesetzt, wenn die eigentlichen Sicherheitsorgane versagen oder wenn diese sogar fehlen (z. B. Strahlablenker bei alten Pelton-turbinen).

1.4 Wirkungsgrad

Die Verbesserung des Maschinen- und Anlagewirkungsgrades ist ein zusätzliches, einleuchtendes Argument für den Erneuerungsentschluss. Allerdings kann mit dem Wirkungsgradgewinn allein und ohne gleichzeitigen Leistungsausbau eine Erneuerung in den seltensten Fällen gerechtfertigt werden.

Schon in früher Zeit wurden in Niederdruck- wie in Hochdruckanlagen bereits beachtliche Turbinenwirkungsgrade erreicht (Augst-Wyhlen 1912: 83 %, Eglisau 1920: 86 %, Ackersand 1909: 86 %, Bramois 1915: 86 %).

Die Wirkungsgraderhöhung von Druckleitung, Turbine und Generator können zusammen oft Verbesserungen von 10 bis 20 % Gesamtwirkungsgrad bringen.

Noch bedeutender wird der Wirkungsgradgewinn in jenen Niederdruckanlagen, in denen alte Francis- oder Propeller-

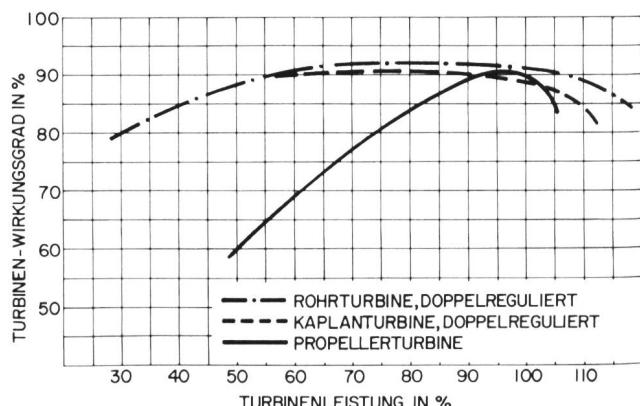


Bild 2. Vergleich des Wirkungsgrades für Propeller-, Kaplan- und Rohrturbine.

turbinen durch Kaplan- oder Rohrturbinen ersetzt werden. Niederdruck-Francis- und Propellerräder besitzen im Teillastgebiet stark abfallende Wirkungsgrade, während sich Kaplan- und Rohrturbinen nicht nur durch hohe Werte, sondern durch einen ausgesprochen flachen Verlauf der Kurve über dem gesamten Betriebsgebiet auszeichnen. Die ungünstige Form der Wirkungsgradkurven bei den alten Einheiten wird allerdings oft durch die vorhandene grosse Anzahl von Gruppen teilweise korrigiert (Bild 2).

Neben der rein wirtschaftlichen Betrachtungsweise des Maschinenwirkungsgrades darf aber in diesem Zusammenhang nicht übersehen werden, dass ein niedriger Wirkungsgrad gleichbedeutend ist mit Energieverlusten, die sich in gewissen Fällen in mechanischen Schwingungen und Materialbeanspruchungen ausdrücken können, die gerade bei überalterten Maschinen zu ernsthaften Schäden führen können, abgesehen von der Lärmentwicklung, die oft auch darin begründet liegt.

1.5 Betriebliche Argumente

Auslöser einer Anlagenerneuerung können auch Rationalisierungsbestrebungen zur Senkung von Betriebs- und Personalkosten werden. Diese sind gerade bei älteren Kleinanlagen unverhältnismässig gross, wenn Betriebsüberwachung und Unterhalt noch im Dreischichtbetrieb erforderlich sind. Umgekehrt kann auch Personalmangel Anstoss zu Rationalisierungs- oder Erneuerungsmassnahmen geben; in mehreren Fällen waren es bevorstehende Pensionierungen im Betriebspersonal, welche den Terminplan von Teil- oder Gesamterneuerungen festlegten.

Für Betriebsrationalisierungen reichen die Massnahmen je nach Ziel von einer Reduktion des Betriebspersonals (z. B. Verzicht auf Nachschicht) bis zum unbemannten, fernüberwachten und -gesteuerten Betrieb.

Auch wasserrechtliche Fragen, der bevorstehende Ablauf der Konzessionsdauer oder die Unwirtschaftlichkeit eines Betriebs können die Abklärung von Sanierungsvarianten erfordern [1]. Was auch immer im Vordergrund stehen mag, nie sollte ein Argument isoliert betrachtet und behandelt werden. Vielmehr muss versucht werden, alle technischen und wirtschaftlichen Aspekte zu erfassen und verschiedene Lösungen zu prüfen, damit Fehlinvestitionen vermieden werden oder damit nicht durch voreilige Teilsanierungen eine grosszügige und energiewirtschaftlich interessante Erneuerung verbaut wird.

Die bei Umbauten und Erneuerungen zu gewinnenden, oft recht bescheidenen Leistungswerte dürfen nicht darüber hinwegtäuschen, dass die gestellten Aufgaben technisch anspruchsvoll sind und grosse Erfahrung und Phantasie verlangen. Erforderlich ist auch Mut zu unüblichen Lösungen und zu Einsparungen (am richtigen Ort). Druckstoss- sowie hydraulische und elektrische Stabilitätsverhältnisse können sich durch Erhöhung der Auslegungsdaten radikal ändern; entsprechende Massnahmen sind vorgängig zu prüfen und nach Möglichkeit zu optimieren. Umgekehrt könnten bei den heutigen Netzverhältnissen bei vielen kleinen Anlagen auf teure Regulierungseinrichtungen verzichtet werden.

Die produzierte Energie kann oft durch Schaffung von Speichern oder Tagesausgleichsbecken aufgewertet werden. In gewissen Fällen muss ferner auch das Zusammenlegen zweier oder mehrerer Kraftwerke und die Bildung von Partnerschaften geprüft werden.

So ist es nicht erstaunlich, dass bei den Erneuerungskosten der Projektionsanteil verhältnismässig hoch werden kann.

2. Erneuerungsgrad

Der Erneuerungsgrad lässt sich summarisch in folgende Stufen einteilen:

- Ersatz eines bestehenden Kraftwerkes durch eine Neuanlage, unter Umständen unter Zusammenlegung mehrerer Ausbaustufen
- Umbau/Ausbau einer bestehenden Anlage unter Weiterverwendung massgeblicher Anlageteile
- teilweiser oder weitgehender Ersatz von elektromechanischen Einrichtungen, Druckleitung, Hilfseinrichtungen, Wehranlage, unter Beibehaltung der wichtigsten Baukörper
- Automatisierung von Maschinengruppen, Wehranlagen, Hilfseinrichtungen
- Stilllegung und Liquidation der Anlage

Aus der bedeutenden Zahl der in den letzten Jahren erfolgreich durchgeföhrten Kraftwerkserneuerungen werden im folgenden einige Beispiele herausgegriffen.

2.1 Ersatz eines bestehenden Kraftwerks durch eine Neuanlage

Mit dem Bau des Kraftwerkes Lötschen im unteren Lötschental (Wallis) wurden die 3 Kraftwerke Gampel 1 bis 3 durch eine einzige Kraftwerkstufe ersetzt. Mit den 1898, 1900 und 1942 erstellten kleinen Kraftwerkanlagen konnte nur Laufenergie erzeugt werden; der Betrieb der dreistufigen, überalterten Anlagen war personalintensiv und teuer. Wesentliches Merkmal der neuen Anlage ist neben der Erhöhung der Ausbauwassermenge die Errichtung des Ausgleichsbeckens Ferden, dessen Nutzhalt als Ergebnis einer Optimierungsrechnung auf 1,7 Mio m³ festgelegt wurde. Das Becken dient dem Tages- und Wochenendausgleich, erlaubt eine wesentliche Aufwertung der produzierten Energie und dient nicht zuletzt der Sicherstellung der Energieversorgung des Aluminiumwerkes in Steg (Tabelle 1).

Ein Beispiel einer erfolgreichen vollständigen Erneuerung eines Flusskraftwerkes ist das neuerrichtete Reuss-Kraftwerk Bremgarten-Zufikon. Hier wurde die 1894 erstellte, in ihrer Konzeption aussergewöhnliche und markante Anlage durch ein modernes Flusskraftwerk mit Rohrturbinen ersetzt. Das im Rahmen der 1970 beschlossenen Reusstal-Sanierung erstellte Projekt gestattete die Erhöhung des Nutzgefälles und der Ausbauwassermenge, womit die Gefällsstufe wieder wirtschaftlich ausgenutzt werden kann.

Neben der Erfüllung ihres Mehrzweckcharakters zeichnet sich die neue Anlage dadurch aus, dass sie sich besonders gut ins Landschaftsbild einfügt (Bild 3).

Vergleich zwischen den alten Anlagen Gampel 1 bis 3 und der neuen Anlage Lötschen
Tabelle 1

| | Alte Anlagen Gampel 1 bis 3 | Neue Anlage Lötschen |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Erstellungsjahr | 1898/1900/1942 | 1975 |
| Installierte Leistung | 19 MW | 110 MW |
| Produktion im Mitteljahr | 113 GWh | 312 GWh |
| Erneuerungskosten | | 1000 Fr./kW |

Vergleich zwischen dem alten Kraftwerk Bremgarten und der neuen Anlage Bremgarten-Zufikon
Tabelle 2

| | Alte Anlage | Neue Anlage |
|-----------------------|-------------|-------------|
| Erstellungsjahr | 1894 | 1975 |
| Installierte Leistung | 1,6 MW | 18,1 MW |
| Jahresproduktion | 12 GWh | 100 GWh |
| Erneuerungskosten | | 2900 Fr./kW |

Die beiden Beispiele, Hochdruckanlage und Spitzenkraftwerk Lötschen und die Niederdruckanlage für Laufenergie Bremgarten-Zufikon, zeigen eindrücklich die Leistungs- und Energiereserven, welche durch zielgerichtete und integrierte Erneuerungsmassnahmen nutzbar gemacht werden können, und dies im Einklang mit ökologischen und landschaftsschützerischen Forderungen.

Da der Bau der Ersatzanlage in diesen Fällen alle Eigenarten einer Neuanlage in sich trägt und die für Erneuerungsbauten sonst typischen Besonderheiten fehlen, sei hier auf eine nähere Beschreibung der Anlagen verzichtet und auf die entsprechenden Fachaufsätze verwiesen [2, 3].

Bei einer umfassenden Neuerstellung einer bereits bestehenden Anlage kann letztere während der gesamten Bauzeit meist uneingeschränkt und unbehindert weiterbetrieben werden, was unter Umständen bedeutend, ja entscheidend Kosten spart.

2.2 Umbau/Ausbau einer bestehenden Anlage

Das aus den Jahren 1907 bis 1909 stammende Limmatkraftwerk Aue, Baden, wurde 1965/66 umfassend um- und ausgebaut, ohne dass dabei seine von aussen sichtbaren Anlagen und Baukörper stark geändert wurden [4].

Augenfälligste Änderung ist der Ersatz des alten Tafelschützenwehrs mit seinem hässlichen hohen Aufbau durch moderne Segmentschützen mit aufgesetzten Klappen, die erlaubten, die Wehrbrücke tiefer zu legen. Diese Wehrbrücke dient heute dem öffentlichen Fußgängerverkehr. Im Innern ihrer Hohlkonstruktion führt sie den regionalen Abwasserkanal und die Gasfernleitung Zürich—Baden. Auch hier wurden mit der Sanierung mehrere Zwecke erfüllt; auch der Verbesserung der Ästhetik wurde Rechnung getragen (Bild 5).

Der 275 m lange Oberwasserkanal blieb in seiner ursprünglichen Form bestehen, hingegen musste der Kanaleinlauf aufgrund der Erhöhung der Ausbauwassermenge von 70 m³/s auf 100 m³/s neu gestaltet werden. Dank Modellversuchen an der ETH Zürich konnten dabei trotz der erhöhten Wasserführung geringere Fallhöhenverluste als bei der alten Ausbauwassermenge erreicht werden.

Das in seiner äusseren Form völlig erhalten gebliebene Maschinenhaus wurde im Innern gründlich umgestaltet. Anstelle der beiden aus dem Jahre 1909 stammenden vertikalen Zwillings-Francis-Turbinen wurden 2 schrägliegende Rohrturbinen eingebaut, während die 3. Einheit mit Jahrgang 1925 lediglich einer gründlichen Revision und der zugehörige Generator einer Neuwicklung und Neublechung unterzogen wurde (Bild 4).

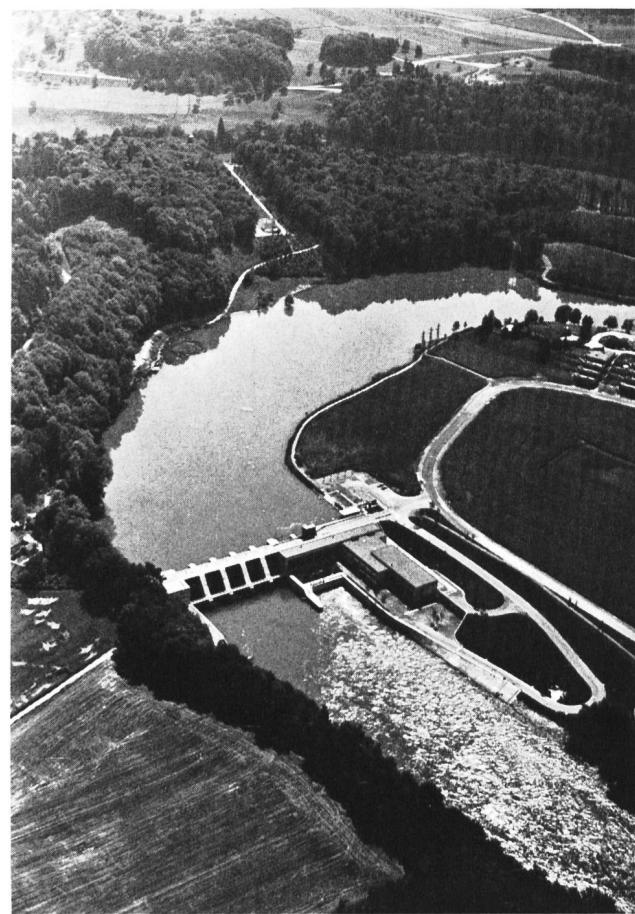


Bild 3. Flugaufnahme der neuen Anlage Bremgarten-Zufikon.

Wie die Schnittbilder zeigen, konnten die bestehenden Fundamente weitgehend übernommen werden, die neuen Rohrturbinen-Einheiten wurden zwischen die bestehenden Pfeiler gebaut. Die Eignung von Rohrturbinen für Erneuerungen von Niederdruckanlagen kam hier besonders schön zur Geltung, konnte doch dank der hohen Schluckfähigkeit dieses Turbinentyps bei gleicher Breitenentwicklung die verarbeitete Wassermenge von vorher 21 m³/s auf 36 m³/s gesteigert werden, so dass die gesamte Erhöhung der Ausbauwassermenge durch die beiden neuen Gruppen allein getragen wird.

Die auf engem Raum auszuführenden Ausbruch-, Gründungs- und Betonierarbeiten wurden trotz allerlei unvorhergesehenen Überraschungen, wie sie für Umbauten typisch sind, gut und rasch gemeistert. Dabei musste auf die während der gesamten Umbauzeit in Betrieb stehende,

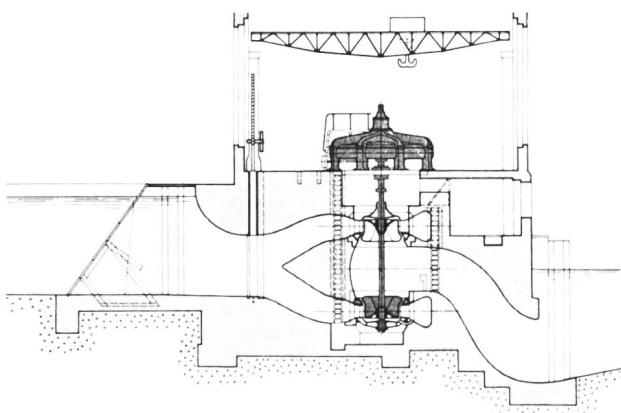
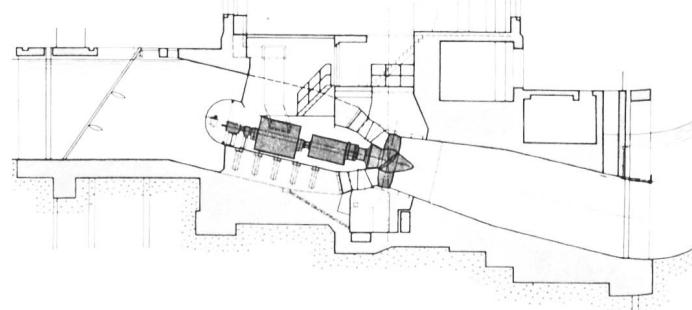


Bild 4. Maschinenhausquerschnitte des alten und des erneuerten Werkes Aue in Baden. In den Jahren 1965/66 wurden zwei vertikalachsige Zwillings-Francisturbinen durch Rohrturbinen mit leicht geneigter Achse ersetzt. Dadurch konnte die installierte Leistung von 2950 kW auf 3900 kW, die jährliche Energieabgabe von 18,7 GWh auf 26 GWh gesteigert werden [4].



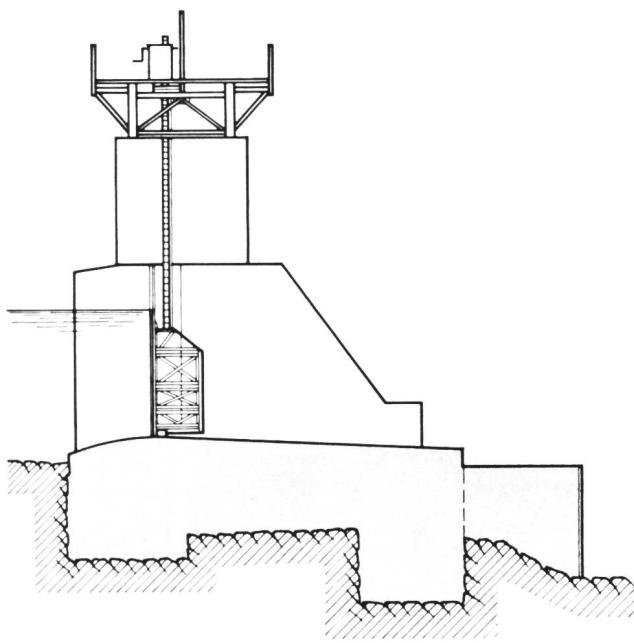
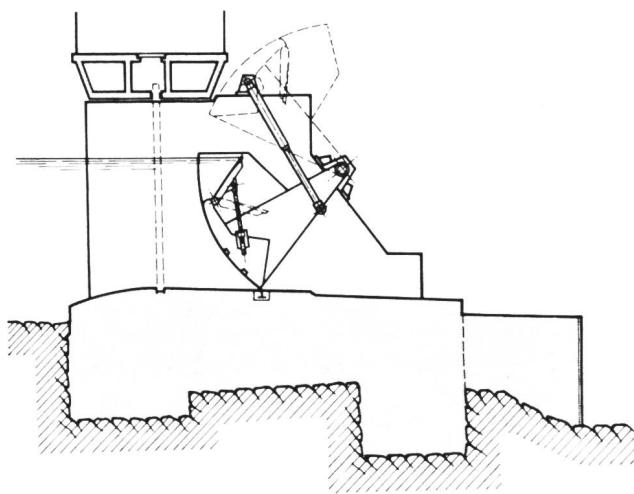


Bild 5. Erneuerung der Wasserkraftanlage Aue bei Baden. Querschnitt durch das alte (links) und das neue Wehr, rechts [4].



sich durch das ganze Maschinenhaus hinziehende 8-kV-Anlage Rücksicht genommen werden. Die Stillstandszeiten betragen lediglich 6½ Monate für die revidierte Gruppe 3 und 9½ bzw. 11½ Monate für die vollständig ersetzen Gruppen 1 und 2.

Modernisiert wurden auch die elektrischen Ausrüstungen. Die Anlage wird heute vom unterliegenden Kraftwerk Kappelerhof aus fernbedient und fernüberwacht. Die kombinierte Turbinen- und Wehrsteuerung reguliert den Oberwasserstand automatisch auf die eingestellte Staukote (Tabelle 3).

Für das 1892 erbaute Limmatkraftwerk *Kappelerhof* wurden seit Jahrzehnten in regelmässigen Abständen Erneuerungen studiert, die den ganzen Bereich von Möglichkeiten, von einem Neubau bis zur Stilllegung und Liquidation, umfassten.

Nachdem die ursprünglich beabsichtigte Erhöhung des Oberwasserspiegels und damit eine wesentliche Erhöhung des Nutzgefälles mit Rücksicht auf Grundwasserbeeinträchtigungen fallengelassen werden musste, wurde 1973 ein bescheidenerer Umbau beschlossen mit einer beschränkten Erhöhung des Nutzgefälles mittels Ausbaggerung des unterwasserseitigen Flussbettes und Erhöhung der Ausbauwassermenge von 40 auf 60 m³/s. Diese Ausbaugrösse wurde durch den weiterhin verwendeten Oberwasserkanal begrenzt. Die Erneuerung limitierte sich damit vorläufig einzig auf das Maschinenhaus. Eingehende Studien ergaben, dass ein Umbau des bestehenden, sehr alten Maschinenhauses mit seinen 4 historischen Maschinengruppen nicht mehr möglich war, und führten in diesem Fall als ökonomischste Lösung zur interessanten Anordnung einer schrägliegenden Rohrturbine in S-Form mit Aufstellung eines Uebersetzungsgtriebes und Generators in einem an das alte Maschinenhaus flussseitig anschliessenden unterirdischen Betonkörper (Bild 6). Auch diese Anlage ist mit moderner Anfahr- und Abstellautomatik, Fernbedienung und -überwachung und einer vom Oberwasserniveau abhängigen Steuerautomatik ausgerüstet. Die Bauzeit der neuen Anlageteile betrug 20 Monate, die Zeitspanne zwischen Stilllegung der alten Anlage und Inbetriebnahme der neuen Gruppe 4 Monate [5].

Eine trotz ihrer bescheidenen Leistungswerte interessante und erwähnenswerte Erneuerung wurde 1968 im Kraftwerk *Morteratsch* der Bündner Kraftwerke durchgeführt. (Bilder 7 und 8.)

Der Erneuerung gingen verschiedene Studien über die ganze Skala von Sanierungsstufen voran. Schliesslich hat sich auch in diesem Fall die Neuerstellung der Zentrale mitsamt den maschinellen und elektrischen Einrichtungen sowie der Ersatz der alten Druckleitung als wirtschaftlichste Lösung erwiesen. Durch den mit diesen Massnahmen erreichten Fallhöhengewinn (geringere Druckverluste der neuen Leitung), die vollständige Ausnützung der konzessionierten Ausbauwassermenge und den verbesserten Maschinenwirkungsgrad konnte Leistung und Produktion beträchtlich gesteigert werden (Tabelle 5).

Vergleich zwischen alter und erneuerter Anlage Aue bei Baden

Tabelle 3

| | Alte Anlage | Erneuerte Anlage |
|--------------------------|---------------|------------------|
| Erstellungsjahr | 1907 bis 1909 | 1965/66 |
| Installierte Leistung | 2950 kW | 3900 kW |
| Produktion im Mitteljahr | 18,7 GWh | 26 GWh |
| Erneuerungskosten | | 3100 Fr./kW |

Vergleich zwischen alter und erneuerter Anlage Kappelerhof

Tabelle 4

| | Alte Anlage | Erneuerte Anlage |
|-----------------------|-------------|------------------|
| Erstellungsjahr | 1892 | 1976 |
| Installierte Leistung | 1200 kW | 2800 kW |
| Jahresproduktion | 9,5 GWh | 20 GWh |
| Erneuerungskosten | | 5400 Fr./kW |

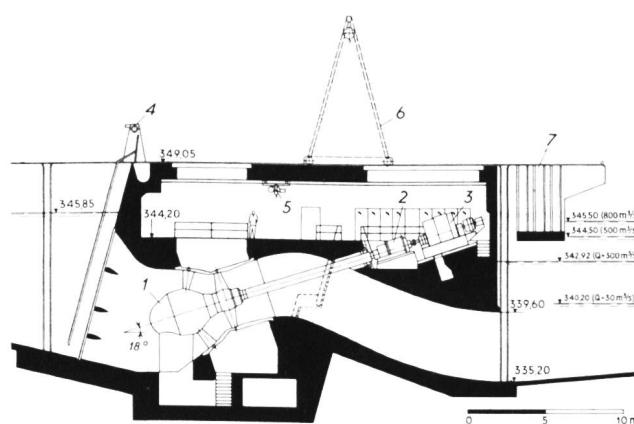


Bild 6. Querschnitt durch das Maschinenhaus des Kraftwerkes Kappelerhof 1:500. 1 Kaplan-S-Rohrturbine, 60 m³/s, 2800 kW, Nettogefälle 5,15 m. 2 Planetengetriebe, 86,3/750 U/min. 3 Generator, 3300 kVA. 4 Automatische Rechenreinigungsmaschine. 5 Deckenlaufkran 2 t. 6 Portalkran 25 t. 7 Damm balkenlager [5].

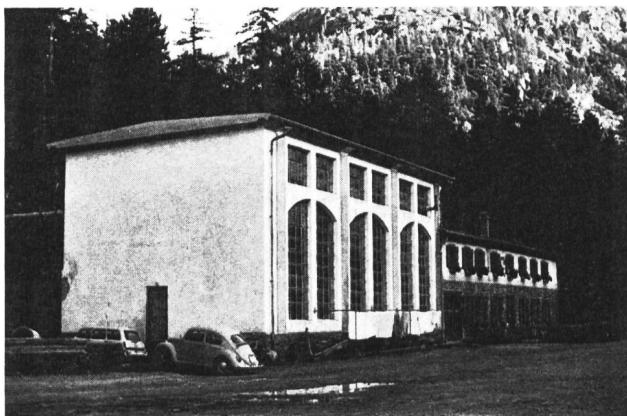


Bild 7. Das 1891 erstellte Kraftwerk Morteratsch. Im Vordergrund das Dieselgebäude, im Hintergrund das Maschinenhaus der hydraulischen Anlage. Im ersten Stock sind die Werkwohnungen untergebracht.

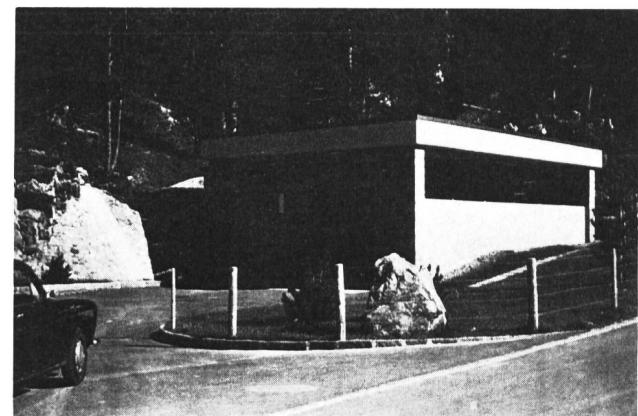


Bild 8. Ansteile des alten Gebäudekomplexes des Kraftwerks Morteratsch wurde 1968 das neue Maschinenhaus gebaut, die Maschinenleistung konnte verdoppelt werden.

Vergleich zwischen alter und erneuerter Anlage Morteratsch

Tabelle 5

| | Alte Anlage | Erneuerte Anlage |
|-----------------------|-------------|------------------|
| Erstellungsjahr | 1891/1926 | 1968 |
| Installierte Leistung | 260 kW | 570 kW |
| Jahresproduktion | 1,96 GWh | 3,3 GWh |
| Erneuerungskosten | | 2600 Fr./kW |

Auch hier konnten die gesamten Umbauarbeiten in erstaunlich kurzer Zeit ausgeführt werden, so dass zwischen Stilllegung der alten Anlage und Inbetriebnahme der neuen Gruppe lediglich 7 Monate verstrichen. Erwähnenswert ist an dieser Kleinanlage mit Laufwerkcharakter die mit der Erneuerung auf einfachste Weise erzielte vollautomatische, unbemannte Betriebsweise. Zwar muss die Maschinengruppe an Ort und Stelle angefahren und ans Netz geschaltet werden, aber der Betrieb geschieht unbemannt durch Selbstüberwachung der wichtigsten mechanischen und elektrischen Betriebswerte, und die Laststeuerung erfolgt ebenfalls automatisch in Abhängigkeit des Wasserzuflusses bzw. des Wasserstandes an der Fassung. Allfällige Störungen im Betriebsablauf setzen die Maschinengruppen selbstständig still und werden auf der Signaltafel in der Zentrale angezeigt. Ein Sammelalarm wird sodann über die Securiton-Uebermittlungsanlage über Telefonnetz an 4 vorgebestimmte und in festgelegter Reihenfolge aufgerufene Telefonabonnenten (Pikettstellen) weitergeleitet.

2.3 Erneuerung von Komponenten von Kraftwerkanlagen

Lassen sich die hydraulischen Auslegungsgrössen, Nutzgefälle und Wassermengen, aus technisch/wirtschaftlichen oder rechtlichen Gründen nicht oder nur unwesentlich erhöhen und sind die wasserführenden Anlageteile wie Fassungen, Zuleitung und Wasserrückgabe in gutem Zustand, kann sich eine Erneuerung eines Kraftwerkes nur auf den Ersatz der maschinellen und/oder elektrischen Einrichtungen oder einzelner Teile im bestehenden Krafthaus beschränken.

Anlass zu einer derartigen beschränkten Erneuerung geben im allgemeinen altersbedingt fehlende Betriebssicherheit und schlechte Betriebseigenschaften; Mängel, die durch verstärkten Unterhalt allein nicht behoben werden können; erhöhte Reparaturanfälligkeit und Betriebsausfälle sowie im Zuge von Automatisierungsbestrebungen erforderliche Anpassungen. Bei Automatisierungsstudien zeigt sich zudem oft, dass alte, noch durchaus zuverlässige Elemente so konstruiert sind, dass sie sich auch mit aller

Phantasie nicht automatisieren lassen. So bleibt nur die Wahl, mit der Automatisierung auf halbem Wege stehen zu bleiben oder die entsprechenden Komponenten zu ersetzen.

Wirtschaftlich zu begründen im Sinne einer erhöhten Leistungsfähigkeit oder Produktion sind diese Teilerneuerungen in seltenen Fällen; da jedoch die damit verbundenen Investitionen nicht sehr gross sind, können diese teilweise durch bestehende Unterhaltsreserven abgedeckt werden.

Im Rheinkraftwerk *Rheinfelden*, wo 20 Maschinengruppen installiert sind, wurden kürzlich auch die 6 von der Aluminiumhütte *Rheinfelden* betriebenen Einheiten saniert und modernisiert.

Vor allem die aus den Jahren 1896 bis 1898 stammenden Gleichstromgeneratoren führten durch häufige Wicklungsschäden zu unliebsamen Reparatur-Stillstandszeiten. Da ferner seit einigen Jahren die unmittelbare Verwendungsmöglichkeit für Gleichstrom entfallen war und dieser mit schlechtem Wirkungsgrad durch Maschinenumformergruppen umgeformt wurde, war ein vollständiger Ersatz der überalterten Gleichstromgeneratoren durch neue Drehstromgeneratoren gegeben.

Bei dieser Erneuerung der Generatoren wurde ein Stirnradgetriebe zur Erhöhung der Turbinendrehzahl von 72/min auf 1000/min zwischengeschaltet, was den Einsatz von bedeutend preisgünstigeren Generatoren erlaubte. Gleichzeitig wurden neben einer Generalrevision und teilweiser Erneuerung der Turbinenregulierorgane die nötigen Stellantriebe und Ueberwachungseinrichtungen für die Fernbedienung der Maschinen eingebaut.

Durch die Sanierung und Modernisierung konnte die mittlere Leistung der 6 Einheiten um 25 % erhöht werden; die Unterhaltskosten sowie der Personalaufwand wurde massgebend verringert. Die Arbeiten wurden in 8 Monaten durchgeführt. Jede Maschinengruppe stand lediglich 4 Wochen still [6].

Wie bei andern in den Kriegsjahren 1939 bis 1945 erbauten Kraftwerkanlagen waren auch beim Kraftwerk *Luchsingen* (Glarus) frühzeitige Alterungerscheinungen festzustellen, besonders bei den kriegsbedingten störungsanfälligen Aluminium-Wicklungen bei einem Generator und den Transformatoren.

Für eine umfassende Erneuerung massgebend war zudem, dass die Generatorenleistung einer der beiden Maschinengruppen nicht an die 1949 realisierte Gefälls- und damit verbundene Leistungserhöhung der Turbine angepasst worden war.

Die Untersuchungen der möglichen Erneuerungsvarianten haben zur technisch und wirtschaftlich interessanten Lösung geführt, bei dieser Maschinengruppe eine Leistungsverhöhung auf den durch die bestehende Zuleitung begrenzten Wert, von 1000 kVA auf 2060 kVA, anzustreben, was einen vollständigen Ersatz der Maschinengruppe durch eine neue Einheit erforderte. Gleichzeitig wurden beide Maschinengruppen mit einer Anfahr- und Abstellautomatik ausgerüstet, die Kommandoanlage erneuert, 2 neue Transformatoren eingebaut sowie die 16-kV-Verteilanlage ersetzt (Bild 9).

Der ganze Umbau konnte in einem Winter durchgeführt werden, und dadurch, dass eine Maschinengruppe stets in Betrieb gehalten wurde, entstand praktisch kein Produktionsausfall. Die Erneuerungskosten beliefen sich auf rund 1000 Fr./kW.

Die an beiden Turbinen abschliessend nach der thermodynamischen Messmethode durchgeföhrten Wirkungsgradmessungen ergaben für die neue Einheit gegenüber den 1949 eingebauten Turbinen einen um 7 % höheren Vollastwirkungsgrad und einen um 4,5 % erhöhten Wirkungsgrad im Bestpunkt.

Nachdem die Kraftwerke Brusio AG 1968/69 die 6 Druckleitungen ihres untersten Kraftwerktes *Campocologno* ersetzten, wurden in den Jahren 1974/75 die Druckleitungen der mittleren Stufen, *Robbia* und *Cavaglia*, erneuert.

Das Kraftwerk *Robbia* (697 m Betriebsdruck) bezieht das Triebwasser aus 2 Druckleitungen, wovon die eine während des letzten Krieges gebaut wurde und die andere schon 1910 den Betrieb aufnahm. Die ältere Druckleitung wurde verschiedentlich auf ihre Betriebstüchtigkeit untersucht. Es liegen Prüfungsresultate von Trepanationen aus den vierziger Jahren vor, die zeigen, dass die Rohre nach heutigem Wissen damals schon stark sprödbruchgefährdet waren. Die damaligen Experten empfahlen keine radikale Sanierung, sondern mildere Massnahmen, wie Normalglühen der Rohre oder Schutz der Rohre gegen schlagartige Beanspruchung von innen und aussen, Massnahmen, die schwer durchführbar waren.

Die Direktion der Kraftwerke Brusio AG beschloss deshalb, die alte Druckleitung durch eine neue zu ersetzen, um die latente Gefahr zu beseitigen. Neuere Studien hatten ergeben, dass von den nachstehenden möglichen Variantenvorschlägen die Variante 1 zu empfehlen sei:

1. Ersatz der alten Druckleitung durch eine neue gleichen Durchmessers
2. Ersatz der alten Druckleitung durch eine neue mit wirtschaftlichstem Durchmesser

3. Ersatz beider Druckleitungen durch eine neue mit wirtschaftlichstem Durchmesser
4. Einziehen neuer Rohre in die alte Druckleitung

Der Abbruch der alten Rohre begann im März 1974. Die Arbeiten gestalteten sich zum Teil sehr schwierig, weil die alten Rohre in engen Galerien über die zweite Druckleitung hinweg gehoben werden mussten, während die letztere ständig in Betrieb blieb. Die neue Druckleitung, 1545 m lang, 307 t schwer, konnte im September des gleichen Jahres dem Betrieb übergeben werden. Der Kraftwerkbetrieb musste nur 6 Wochen unterbrochen werden. In dieser Zeit wurden Rest-Korrosionsschutzarbeiten, Druckprobe, Anschluss an die Verteilleitung u. a. m. durchgeführt.

Die aus dem Jahre 1927 stammende 750 m lange *Cavaglia*-Druckleitung mit Durchmessern von 1200 bis 1000 mm und Wandstärken bis zu 30 mm war in einem Rohrstollen offen verlegt und führte direkt in die Zentrale *Cavaglia*. Der Betriebsdruck beträgt maximal 275 m. Untersuchungen an im Jahre 1972 entnommenen Trepanationen ergaben, dass die Schweißnähte nicht nur zahlreiche Risse und innere Fehler aufwiesen, sondern auch die sehr niedrigen Kerbschlagzähigkeiten deuteten auf eine zu geringe Sprödbruchsicherheit. Die alte Druckleitung wurde im Jahre 1975 während 4 Monaten durch eine neue, 130 t schwere Leitung ersetzt, deren Wände 9 mm stark sind.

Die Druckleitung der oberen Stufe, Kraftwerk *Palü*, stammt aus dem gleichen Jahr wie die *Cavaglia*-Druckleitung. Obwohl die Rohre der *Palü*-Leitung wahrscheinlich die gleichen Fehler aufweisen wie diejenige von *Cavaglia*, konnte mit gutem Gewissen empfohlen werden, die *Palü*-Druckleitung bis zum Konzessionsende im heutigen Zustand zu lassen.

Sie ist nämlich entweder eingegraben oder verläuft in geschlossenen Stollen. Nach menschlichem Ermessen wäre selbst bei einem Rohrbruch kein Menschenleben gefährdet, zumal in der Nähe der Druckleitung keine Siedlungen zu finden sind.

Das Beispiel der Sanierung der Druckleitungen der Kraftwerke Brusio AG zeigt, dass beim Entscheid über «Sein oder Nichtsein» von alten Druckleitungen das Risiko, das Gefahrenmoment und vor allem die Gefährdung von Menschenleben mit entscheidend sind (Bilder 10 und 11).

2.4 Automatisierungen

Die in den dreissiger und vierziger Jahren entstandenen Kraftwerkanlagen, darunter die ersten als «Grossanlagen» zu bezeichnenden, sind mit maschinellen und elektrischen

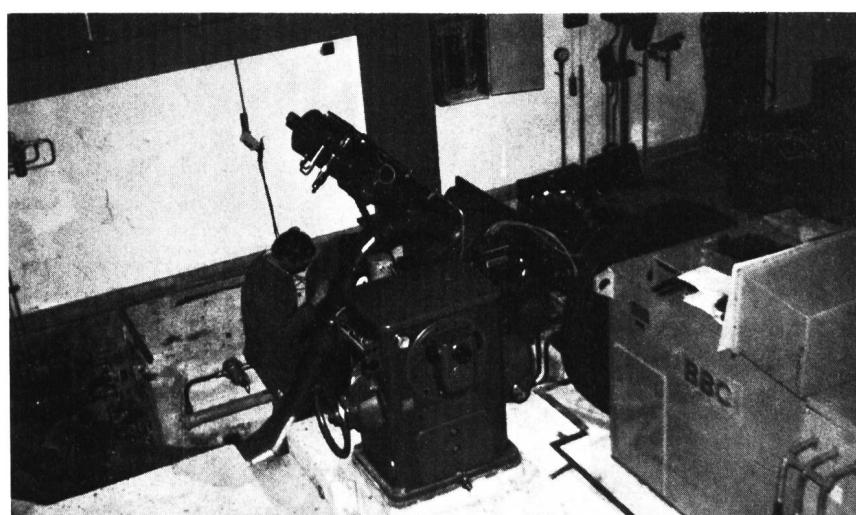


Bild 9. Das 1975/76 erneuerte Kraftwerk Luchsingen im Kanton Glarus. Man erkennt die abgedeckte zweidüsige Pelton-turbine und den verschalteten Generator. Die Leistung der Anlage konnte von 1000 kVA auf 2060 kVA gesteigert werden.



Bild 10. Links die neue (1974), rechts die alte (1910) Druckleitung des Kraftwerkes Robbia der Kraftwerke Brusio AG. Kurz vor der Betriebsaufnahme der neuen Leitung zerstörte am 10. November 1974 ein Steinschlag die alte Druckleitung. Die neue Druckleitung wurde nur leicht beschädigt.



Bild 11. Beim Bau der neuen Druckleitung des Kraftwerkes Robbia konnte das Betonwiderlager der alten Leitung für den Fixpunkt der neuen Leitung mitverwendet werden. Man erkennt die Verankerung der neuen Druckleitung.

Ausrüstungen versehen, die als durchaus neuzeitlich gelten können und im allgemeinen zuverlässig und betriebsicher sind. In diesen Werken wurden und werden auch Anlageteile im Rahmen des normalen Unterhalts laufend saniert und den neuesten betrieblichen Bedürfnissen angepasst. Gesamterneuerungen unter Einbezug der Turbinen-Generator-Einheiten sind im heutigen Zeitpunkt meist noch nicht aktuell, vorausgesetzt, dass nicht gleichzeitig die Anlage wesentlich höher ausgebaut werden kann. Hingegen können durch gezielte Automatisierung graduell Betriebspersonal abgebaut und damit die Betriebskosten gesenkt werden.

Für das Aarekraftwerk *Klingnau* (erstellt 1935, installierte Leistung 37 MW) wurden in einer ausführlichen Vorstudie verschiedene Automatisierungsvarianten technisch und wirtschaftlich untersucht. Gegenübergestellt wurden folgende Ausbaumöglichkeiten:

- A: Einführung eines Einmann-Schichtbetriebes
- B: Aufhebung des Schichtbetriebs, jedoch Fernbedienung ab Fernleitstelle mit Tages- und Pikettdienst
- C: Vollautomatischer Betrieb mit Pikettdienst

Untersucht wurden die notwendigen Anpassungen und Ergänzungen an Regulier- und Steuerorganen der Turbinen, Spurlager, Generatorbremse, Wehrschützensteuerung und Pegelmesseinrichtung, Rechengefällsmesseinrichtung, Niveauregelung, Steuer- und Ueberwachungseinrichtungen für die Maschinengruppen und allgemeinen Anlagen, Eigenbedarfsanlagen, Hilfsbetriebe, Alarmerfassungs- und Uebermittlungsanlage, Brandmeldeanlage, Freiluftschatzanlage. Das Ergebnis der Untersuchungen kann wie folgt zusammengefasst werden:

| Ist-Zustand | Ausbaualternativen | | |
|---|--------------------|--------------------|------------------------------------|
| | A | B | C |
| Investitionskosten einschliesslich Bauzinsen, Energieausfall und Projektierungskosten | 100 % | 170 % | 270 % |
| Schichtpersonal | 10 Mann | 5 Mann (5 Mann) | 4,5 Mann (5,5 Mann) (7 Mann) |
| Mittlere Jahreskosten | 100 % | 70 % | 77 % 80 % |

Es zeigt sich, dass mit jeder der 3 untersuchten Automatisierungsmöglichkeiten die Jahreskosten gesenkt werden können. Für die Entscheidung, welches Erneuerungsprogramm schliesslich zu verfolgen sei, wird allerdings nicht nur der Kostenvergleich massgebend sein, sondern die 3 Ausbauvarianten sind auch technisch zu bewerten,

und betriebs- und personalpolitische Überlegungen sind mit zu berücksichtigen.

Aehnliche Untersuchungen im Rheinkraftwerk *Reckingen* (erbaut 1941) führten durch die werksintern studierte und durchgeföhrte «Rationalisierung der kleinen Schritte» zur Einföhrung eines Einmann-Schichtbetriebs und zu einer bedeutenden Senkung des Personalbestandes [7].

Generell sind Automatisierungen mit automatisierter Steuerung und Ueberwachung bei Hochdruckanlagen einfacher und konsequenter zu realisieren als bei Flusskraftwerken. Der Grund liegt hauptsächlich im sehr breiten Spektrum bezüglich Gefälle und Wassermenge, das durch das Flusskraftwerk zu verarbeiten ist, während bei älteren Hochdruckanlagen die Betriebsvariationen doch recht gering sind. Die natürlichen Einflüsse durch Hochwasser im zugehörigen Flusslauf, aber auch in Nebenzuflüssen, stellen oft heikle Probleme an eine automatische niveauabhängige Turbinen- und Wehrsteuerung, doch sind in den letzten Jahren auch für komplexe Betriebsbedingungen zuverlässige Lösungen gefunden worden.

Schwierig und aufwendig ist nach wie vor die Automatisierung von Rechenreinigungs- und Geschwemmselbeseitigungsanlagen. Aber auch auf diesem Gebiet sind schon interessante Rationalisierungen durchgeführt worden.

2.5 Stillegung und Liquidation einer Kraftwerkanlage

Ein Wort noch zu dieser letzten Stufe in der Skala der Sanierungsmöglichkeiten, welche möglicherweise den Juristen mehr beschäftigen wird als den Ingenieur. Als Alternative zu andern Sanierungsmethoden dürfen aber die technischen und finanziellen Folgen einer Stillegung nicht ausser acht gelassen werden. Wenn der Kraftwerkbesitzer aufgrund von Konzessionsbestimmungen zum Beispiel gehalten werden kann, nach einer allfälligen Stillegung die Umgebung des Kraftwerks entsprechend dem Zustand vor der Konzessionserteilung wiederherzustellen, kann dies mit beträchtlichen Kosten verbunden sein. Wehranlagen müssen oft für die Abflussregulierung erhalten bleiben; ihr Abbruch könnte die Geschiebe- und Grundwasserverhältnisse ungünstig beeinflussen. Müssen Wehranlagen weiter betrieben und unterhalten werden, kann das sehr teuer sein. Aehnliches gilt für Zufahrtswege, Brücken oder andere Anlageteile, die der Oeffentlichkeit dienten, aber vom Kraftwerkbesitzer auf seine Kosten unterhalten und gepflegt wurden.

Stilllegung und Liquidation können für den Betreiber wie für die öffentliche Hand ausgesprochen kostspielig und unwirtschaftlich sein.

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse von Kraftwerkerneuerungen

Die Analyse einer Kraftwerkerneuerung muss die Frage abklären, ob die Erneuerung vom wirtschaftlichen Standpunkt aus gerechtfertigt ist (absolute Wirtschaftlichkeit) und welche der Erneuerungsvarianten optimal ist (relative Wirtschaftlichkeit).

Hierzu müssen die Erneuerungsvarianten sowohl untereinander als auch mit dem Ist-Zustand verglichen werden. Wie das folgende Beispiel zeigt, ist der Energiegestehungspreis des bestehenden sowie des erneuerten Kraftwerkes kein geeignetes Instrument dafür:

Eine Gemeinde deckt den Energiebedarf von 10 GWh/Jahr zu 30 % aus einem eigenen Wasserkraftwerk, der einen Energiegestehungspreis von 5 Rp./kWh aufweist, und zu 70 % durch Fremdstrombezug zu einem Durchschnittspreis von 10 Rp./kWh. Es besteht die Möglichkeit, das Kraftwerk zu erneuern und dadurch seine Erzeugung zu erhöhen. Gemäss einer ersten Variante könnte man durch Ersetzung von Druckleitungen und Turbinen die Eigenproduktion um die Hälfte steigern, und dies bei einem Energiegestehungspreis von 4 Rp./kWh für die gesamte eigene Produktion. Bei einer zweiten Variante würde man zusätzlich mittels eines Dammes einen kleinen Stausee bilden und dadurch die Eigenerzeugung verdreifachen, wobei der Energiegestehungspreis 6 Rp./kWh betragen würde. Wenn man nun die beste Lösung aufgrund des Energiegestehungspreises bestimmen würde, müsste man sich für die erste Variante entscheiden, gemäss welcher der Energiegestehungspreis von 5 auf 4 Rp./kWh gesenkt und die Produktion um die Hälfte erhöht wird. Die zweite Variante wäre bei solcher Betrachtungsweise ungünstiger, da sie zwar eine Produktionsverdreibachung ermöglicht, aber einen Energiegestehungspreis von 6 Rp./kWh aufweist, d.h. mehr als beim Ist-Zustand. Diese Betrachtungsweise ist jedoch falsch. Wenn man nämlich die jährlichen Gesamtkosten der Energiebedarfsdeckung vergleicht, stellt man fest, dass die zweite Variante trotz dem etwas höheren Energiegestehungspreis die optimale Lösung darstellt.

Ist-Zustand

Eigenproduktion 3 GWh/Jahr zu 5 Rp./kWh

Energiezukauf 7 GWh/Jahr zu 10 Rp./kWh

Gesamtkosten der Energiebedarfsdeckung 850 000 Fr./Jahr

Erste Variante

Eigenproduktion 4,5 GWh/Jahr zu 4 Rp./kWh

Energiezukauf 5,5 GWh/Jahr zu 10 Rp./kWh

Gesamtkosten der Energiebedarfsdeckung 730 000 Fr./Jahr

Zweite Variante

Eigenproduktion 9 GWh/Jahr zu 6 Rp./kWh

Energiezukauf 1 GWh/Jahr zu 10 Rp./kWh

Gesamtkosten der Energiebedarfsdeckung 640 000 Fr./Jahr

Besser als der Vergleich der Jahreskosten ist die Barwertmethode, insbesondere dann, wenn die Erneuerungsvarianten in einzelnen Jahren schwankende Kosten aufweisen, wie dies zum Beispiel bei etappenweisem Ausbau der Fall ist.

Bei den Barwertmethoden wird für jede Variante sowie den Ist-Zustand ein Zahlungsplan (bzw. -strom) aufgestellt, der eine genügend lange Periode, am besten die Umbau-

zeit und die anschliessende Lebensdauer, umfasst, und dann wird der Gegenwartswert des Zahlungsstromes, der sogenannte Barwert, durch Diskontieren und Aufaddieren der Zahlungen berechnet. Falls man nur die Kosten vergleichen muss, da alle Varianten den gleichen Nutzen aufweisen wie der Ist-Zustand, ist jene Lösung am besten, welche den niedrigsten Kostenbarwert hat. Wenn der Nutzen der einzelnen Varianten unterschiedlich ist, so dass auch die Erträge zum Vergleich herangezogen werden müssen, ist die Lösung mit der grössten Differenz zwischen dem Ertragswert und dem Kostenbarwert optimal.

Grossen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Kraftwerkerneuerung hat die Länge der Umbauzeit und der damit verbundene Ausfall in der Energieerzeugung. Dieser ist jeweils als effektiver Kostenanfall bzw. Ertragsausfall beim Eigentümer zu bewerten. In anderen Worten, wird die Erzeugung zur Deckung des eigenen Energiebedarfs verwendet, so sind als Energieausfall während der Umbauzeit jene Kosten in Rechnung zu setzen, welche durch die Beschaffung der nicht verfügbaren Energie verursacht werden. Wenn dagegen die erzeugte Energie an Fremde verkauft wird, ist der Energieausfall durch die ausbleibenden Erträge gegeben.

Zum Schluss sei an das wichtige Verhältnis zwischen der Erneuerungswürdigkeit einerseits und der Kraftwerkleistung andererseits hingewiesen. Im Gegensatz zu Neubauten, von denen die meisten heutzutage erst ab einer bestimmten, ziemlich hohen Leistung wirtschaftlich sind, liegt diese Leistungsschwelle bei Kraftwerkerneuerungen dank den bereits vorhandenen Leitungen, Fassungen, Wehren, Infrastruktureinrichtungen usw. wesentlich tiefer, so dass es sich lohnt, auch kleinere alte Kraftwerke diesbezüglich technisch und wirtschaftlich zu untersuchen.

Die Bauherren der erneuerten Wasserkraftanlagen

| | |
|--------------------|---------------------------------|
| Lötschen | EW Lonza/Alusuisse |
| Bremgarten-Zufikon | Aargauisches Elektrizitätswerk |
| Aue, Baden | Städtische Werke Baden |
| Kappelerhof, Baden | Städtische Werke Baden |
| Morteratsch | Bündner Kraftwerke AG |
| Rheinfelden | Aluminiumhütte Rheinfelden GmbH |
| Luchsingen | Elektrizitätsversorgung Glarus |
| Robbia | Kraftwerke Brusio AG |
| Cavaglia | Kraftwerke Brusio AG |
| Palü | Kraftwerke Brusio AG |
| Klingnau | Aarewerke AG |
| Reckingen | KW Reckingen AG |

Literatur

- [1] Walter Pfeiffer: Zur energiewirtschaftlichen Bedeutung der frühzeitigen Neuregelung von ablaufenden Wasserrechtsverleihungen. «Wasser, Energie, Luft» 69 (1977), Heft 1/2, S. 13–15.
- [2] Christian Fux: Das Kraftwerk Lötschen. «Wasser- und Energiewirtschaft» (1974), Heft 8/9, S. 278–286.
- [3] Paul Fischer: Das Kraftwerk Bremgarten-Zufikon. «Wasser- und Energiewirtschaft» 66 (1974), Heft 4/5, S. 149–154.
- [4] Daniel Vischer, Arthur Scherer: Der Umbau des Kraftwerk Aue, Baden. «Wasser- und Energiewirtschaft» 59 (1967), Heft 1, S. 12–17.
- [5] Joseph Stalder: Erneuerung des Kraftwerks Kappelerhof in Baden. «Wasser, Energie, Luft» 68 (1976), Heft 5, S. 120–125.
- [6] Alois Schollmeyer: Erhöhung der elektrischen Energieerzeugung und Betriebskostenreduktion durch Modernisierung im Wasserkraftwerk Rheinfelden. «Wasser, Energie, Luft» 68 (1976), Heft 4, S. 94–96.
- [7] Hans Frei: Rationalisierung der kleinen Schritte. «Wasser, Energie, Luft» 68 (1976), Heft 4, S. 90–91.
- [8] Ausmass und Bedeutung der noch ungenutzten Schweizer Wasserkräfte — Beitrag des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes zur Erarbeitung der Gesamtenergiekonzeption. «Wasser, Energie, Luft» 69 (1977), Heft 5.

Adresse der Verfasser: Walter Nüssli, Sidney Jacobsen und Vladimir Bohun in Firma Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, 5401 Baden.

Talsperren, die 1976 der Oberaufsicht des Bundes unterstellt sind

Barrages soumis à la surveillance de la Confédération en 1976

Sbarramenti idrici sottomessi alla sorveglianza della Confederazione nel 1976

Diese Angaben wurden mit freundlicher Genehmigung des Eidgenössischen Amtes für Strassen- und Flussbau der jüngsten Veröffentlichung entnommen: Hochwasserschutz in der Schweiz — 100 Jahre Bundesgesetz über die Wasserbau-polizei. Zu beziehen bei der Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern. Preis 34 Franken.

| Nome | Compi- mento | Cantone | Tipo | Altezza (m) | Lunghezza (m) | Lago di accumulazione livello massimo m s. m. | volume utile 10^6 m^3 |
|-------------------------|-----------------|---------|------|----------------|------------------|--|------------------------------------|
| Grande Dixence | 1962 | VS | G | 284 | 700 | 2364 | 400 |
| Mauvoisin | 1958 | VS | B | 237 | 520 | 1962 | 180 |
| Contra | 1965 | TI | B | 221 | 380 | 470 | 105 |
| Luzzone | 1963 | TI | B | 208 | 530 | 1591 | 87 |
| Emosson | 1974 | VS | B | 180 | 555 | 1930 | 225 |
| Zeuzier a) | 1957 | VS | | | | 1777 | 50 |
| b) Proz Rond | | | B | 156 | 256 | | |
| Göscheneralp | 1960 | UR | E-S | 155 | 540 | 1792 | 75 |
| Curnera | 1966 | GR | B | 152 | 350 | 1956 | 41 |
| Zervreila a) | 1957 | GR | | | | | |
| b) | | | B | 151 | 504 | 1862 | 100 |
| Moiry | 1958 | VS | B | 148 | 610 | 2249 | 77 |
| Gigerwald | 1976 | SG | B | 147 | 430 | 1335 | 34 |
| Limmern | 1963 | GL | B | 145 | 375 | 1857 | 90 |
| Valle di Lei | 1961 | GR | B | 143 | 710 | 1931 | 197 |
| Sambuco | 1956 | TI | BG | 130 | 363 | 1461 | 63 |
| Punt dal Gall (Livigno) | 1969 | GR | B | 130 | 540 | 1805 | 164 |
| Nalps | 1962 | GR | B | 128 | 480 | 1908 | 45 |
| Hongrin Nord | 1968 | VD | | | | 1255 | 53 |
| Sud | | | B | 125 | 325 | | |
| Gebidem | 1967 | VS | B | 122 | 325 | 1437 | 9 |
| Mattmark | 1967 | VS | E-S | 120 | 770 | 2197 | 100 |
| Santa Maria | 1968 | GR | B | 117 | 560 | 1908 | 67 |
| Albigna | 1959 | GR | GP | 115 | 810 | 2163 | 67 |
| Grimsel Spitallamm | 1932 | BE | | | | 1909 | 100 |
| Seeuferegg | | | BG | 114 | 258 | | |
| Wägital / Schräh | 1924 | SZ | G | 111 | 156 | 900 | 147 |
| Cavagnoli | 1968 | TI | B | 111 | 320 | 2310 | 28 |
| Oberaar | 1954 | BE | GP | 100 | 526 | 2303 | 58 |
| Rätherichsboden | 1950 | BE | GP | 94 | 456 | 1767 | 27 |
| Malvaglia | 1959 | TI | B | 92 | 290 | 990 | 4 |
| Marmorera (Castiletto) | 1954 | GR | E | 91 | 400 | 1680 | 60 |
| Cleuson/St-Barthélemy | 1950 | VS | GP | 87 | 420 | 2186 | 20 |
| Les Toules | 1963 | VS | B | 86 | 460 | 1810 | 20 |
| Rossens | 1947 | FR | B | 83 | 320 | 677 | 180 |
| Naret | 1970 | TI | | | | 2310 | 31 |
| Naret I | | | B | 80 | 440 | | |
| Naret II | | | G | 45 | 260 | | |
| Mapragg | 1976 | SG | G | 75 | 140 | 865 | 2,5 |
| Z'Mutt | 1964 | VS | B | 74 | 144 | 1970 | 0,8 |
| Châtelot | 1953 | NE | B | 74 | 150 | 716 | 20,5 |
| Ova Spin | 1968 | GR | B | 73 | 129 | 1630 | 7 |
| Lucendro | 1947 | TI | P | 73 | 270 | 2135 | 25 |
| Palagnedra | 1953 | TI | BG | 72 | 120 | 486 | 4,1 |
| Roggiasca | 1965 | GR | B | 71 | 177 | 954 | 0,5 |
| Vasasca | 1967 | TI | B | 69 | 107 | 728 | 0,4 |
| Ferden | 1975 | VS | B | 68 | 107 | 1311 | 1,7 |

| Nom | Achèvement | Canton | Type | Hauteur (m) | Longueur (m) | Lac d'accumulation | |
|-----------------------|------------|--------|-------|----------------|-----------------|------------------------|------------------------------------|
| | | | | | | niveau max. m s. m. | volume utile 10^6 m^3 |
| Robiei | 1967 | TI | GP | 68 | 356 | 1940 | 7 |
| Bärenburg | 1961 | GR | G | 64 | 110 | 1080 | 1,4 |
| Gries | 1966 | VS | G | 60 | 400 | 2387 | 17,1 |
| Sufers | 1962 | GR | B | 58 | 125 | 1401 | 18,3 |
| Schiffenen | 1963 | FR | B | 57 | 417 | 532 | 35,5 |
| Montsalvens | 1920 | FR | B | 55 | 115 | 801 | 11 |
| Salanfe | 1952 | VS | G | 52 | 616 | 1925 | 40 |
| Molina / Calancasca | 1951 | GR | G | 52 | 70 | 687 | 0,8 |
| Vieux Emosson | 1955 | VS | BG | 51 | 180 | 2205 | 13,5 |
| Illgraben | 1970 | VS | G | 50 | 65 | 1050 | * |
| Eggschi / Rabiusa | 1949 | GR | G | 50 | 80 | 1151 | 0,5 |
| Isola | 1960 | GR | BG | 45 | 290 | 1604 | 6 |
| St-Barthélemy B | 1975 | VS | B | 45 | 90 | 1003 | * |
| Garichte | 1931 | GL | | | | 1623 | 3 |
| West | | | G | 42 | 229 | | |
| Ost | | | G | 18 | 254 | | |
| Sanetsch | 1964 | VS | GP | 42 | 210 | 2034 | 2,7 |
| Carmena | 1969 | TI | B | 40 | 100 | 637 | 0,25 |
| Orden | 1971 | GR | B | 40 | 180 | 1788 | 1,7 |
| Carassina | 1963 | TI | B | 38 | 112 | 1701 | 0,19 |
| Zöt | 1967 | TI | B | 36 | 145 | 1940 | 1,6 |
| Bannalp | 1937 | NW | E | 36 | 182 | 1586 | 1,5 |
| Sella | 1947 | TI | G | 36 | 334 | 2256 | 9 |
| Godey | 1975 | VS | E | 35 | 170 | 1398 | 0,9 |
| Gelmer | 1929 | BE | G | 35 | 370 | 1849 | 13 |
| Göschenerreuss | 1949 | UR | G | 35 | 71 | 1084 | 0,1 |
| Verbois | 1943 | GE | G/P/E | 35 | 400 | 369 | 12 |
| Lessoc | 1973 | FR | P | 33 | 20 | 774 | 0,75 |
| Sihlsee | 1936 | SZ | | | | 889 | 91,8 |
| In den Schlagen | | | G | 33 | 127 | | |
| Hühnermatt | | | E | 18 | 155 | | |
| Runcahez / Somvix | 1960 | GR | GP | 33 | 180 | 1277 | 0,43 |
| Clées | 1955 | VD | G | 32 | 100 | 743 | 0,6 |
| Pfaffensprung | 1921 | UR | B | 32 | 64 | 807 | 0,2 |
| Rempen | 1924 | SZ | G | 32 | 128 | 642 | 0,5 |
| Turtmann | 1958 | VS | B | 32 | 110 | 2177 | 0,8 |
| Fionnay GD | 1957 | VS | S | 31 | 100 | 1486 | 0,3 |
| Rossinière | 1972 | VD | P | 30 | 35 | 860 | 1,7 |
| Val d'Ambra | 1965 | TI | E | 30 | 105 | 603 | 0,4 |
| Châtelard CFF | 1976 | VS | E | 30 | 110 | 1116 | 0,2 |
| Wettingen | 1930 | AG | GP | 29 | 140 | 380 | 6 |
| Wohlensee / Mühleberg | 1920 | BE | G | 28 | 250 | 481 | 27 |
| Inner Ferrera | 1962 | GR | G | 28 | 61 | 1443 | 0,3 |
| Ferpècle | 1964 | VS | B | 28 | 91 | 1895 | 0,1 |
| Lago Bianco | 1927/45 | GR | | | | 2234 | 18 |
| Bernina Süd | | | G | 27 | 190 | | |
| Nord | | | G | 16 | 280 | | |
| Klöntal | 1910 | GL | E | 27 | 217 | 848 | 50 |
| Illsee | 1924/43 | VS | G | 27 | 295 | 2360 | 6,4 |
| Mattenalp | 1950 | BE | G | 27 | 98 | 1876 | 2,0 |
| Ritom | 1920/53 | TI | G | 27 | 300 | 1850 | 47 |
| Schlattli | 1965 | SZ | G | 25 | 40 | 550 | 0,35 |
| Tannensee | 1958 | OW | E | 25 | 640 | 1975 | 4 |
| Gübsenmoos | 1900 | SG | | | | 683 | 1,5 |
| Ost | | | G | 24 | 105 | | |
| West | | | E | 17 | 308 | | |
| Preda | 1961 | GR | B | 23 | 92 | 1948 | 0,37 |
| Le Pontet | 1970 | VD | G + E | 22 | 54 | 792 | 0,1 |
| Serra | 1952 | VS | B | 22 | 75 | 1278 | 0,2 |
| Zen Binnen | 1953 | VS | B | 22 | 46 | 1308 | 0,2 |
| Plons Mels | 1947 | SG | | | | 1030 | 0,5 |
| Nord (Barmort) | | | G | 20 | 124 | | |

| Name | Fertigstellung | Kanton | Typ | Höhe (m) | Länge (m) | Stausee Stauziel m ü M | Nutzinhalt 10 ⁶ m ³ |
|----------------------|----------------|--------|-------|----------|-----------|------------------------|---|
| Ost (Barmort) | | | G | 12 | | | |
| Darbola | 1958 | GR | G | 20 | 120 | 1152 | 0,12 |
| Les Esserts | 1972 | VS | E | 20 | 300 | 1516 | 0,22 |
| Prä | 1961 | GR | G | 20 | 18 | 1080 | 0,02 |
| Totensee | 1949 | VS | G | 20 | 74 | 2160 | 2,5 |
| Airolo | 1968 | TI | G/E | 20 | 60/500 | 1135 | 0,37 |
| Plans Mayens | 1971 | VS | E | 20 | 180 | 1574 | 0,13 |
| Les Marécottes | 1925 | VS | mB | 19 | | 1120 | 0,05 |
| Löbbia | 1959 | GR | G | 18 | 90 | 1418 | 0,2 |
| La Fouly | 1972 | VS | G | 18 | 58 | 1574 | 0,02 |
| Brigels | 1960 | GR | E | 18 | 250 | 1255 | 0,3 |
| Arnensee | 1942/56 | BE | E | 17 | 140 | 1543 | 10,3 |
| Essampilles / Icogne | 1962 | VS | E | 17 | 52 | 1417 | 0,04 |
| Schöni | 1961 | UR | G | 17 | 66 | 1889 | 0,02 |
| Val de Mulin / Laax | 1962 | GR | E | 16 | 230 | 1059 | 0,07 |
| Giétroz du Fond | 1965 | VS | G | 15 | 22 | 1816 | 0,02 |
| Safien Platz | 1958 | GR | E | 15 | 470 | 1295 | 0,23 |
| Waldialp | 1961 | SZ | | | | 1405 | 0,25 |
| Nord | | | E | 15 | 70 | | |
| Süd | | | E | 15 | 150 | | |
| Waldhalde | 1895 | ZH | E | 15 | 120 | 683 | 0,25 |
| Palü | 1928 | GR | | | | 1928 | 0,17 |
| Palü I | | | G | 14 | | | |
| Palü II | | | G | 12 | | | |
| Handeck | 1942 | BE | E | 14 | 145 | 1302 | 0,08 |
| Zermeiggern | 1964 | VS | E | 14 | | 1738 | 0,1 |
| Arriboden | 1910 | UR | E | 14 | | 1371 | 0,26 |
| Fully | 1914/17 | VS | G | 14 | 110 | 2139 | 3,2 |
| Frid | 1966 | VS | E | 13 | | 1741 | 0,05 |
| Isel | 1969 | GR | E | 12 | 45 | 1606 | 0,2 |
| Wanna Safien | 1957 | GR | E | 12 | 540 | 1720 | 0,3 |
| Peccia | 1954 | TI | E | 12 | 250 | 1302 | 0,12 |
| Obermatt | 1962 | OW | E | 11 | | 660 | 0,1 |
| Louvie | 1966 | VS | G | 11 | 40 | 2213 | 0,2 |
| Linthal | 1964 | GL | E | 11 | | 676 | 0,21 |
| Châtelard ESA | 1972 | VS | G | 11 | | 1122 | 0,09 |
| Corina / Moesa | 1960 | GR | E | 11 | | 1190 | 0,12 |
| Fionnay FMM | 1956 | VS | E | 11 | | 1493 | 0,16 |
| Burvagne | 1941 | GR | G | 11 | 52 | 1117 | 0,2 |
| Hintersand | 1962 | GL | E | 9 | | 1298 | 0,1 |
| Melchsee | 1958 | OW | E | 8 | 295 | 1893 | 3,5 |
| Spiezermoos | 1908 | BE | E | 7 | | 628 | 0,4 |
| Mattsand | 1958 | VS | E | 6,5 | | 1230 | 0,2 |
| Rodi | 1940 | TI | G | 6 | 150 | 945 | 0,13 |
| Murgsee | 1925 | SG | G + E | 5 | 90 | 1820 | 1,9 |

Total 146

Legende
 G Gewichtsstaumauer
 P Pfeilerstaumauer
 GP Gewichtsstaumauer mit Sparräumen
 B Bogenstaumauer
 BG Bogengewichtsstaumauer
 E Erddamm
 S Stein-damm
 mB Mehrfachbogenmauer
 • Wildbachsperrre

Légende
 Barrage-poids
 Barrage à contreforts
 Barrage-poids évidé
 Barrage-vôûte
 Barrage poids-vôûte
 Digue en terre
 Digue en enrochements
 Barrage à vòûtes multiples
 Barrage en torrents

Leggenda
 Diga a gravità
 Diga a contraforti
 Diga a gravità alleggerita
 Diga ad arco
 Diga ad arco-gravità
 Diga in terra
 Diga in scogliera
 Diga ad archi multipli
 Briglia

Bemerkung / Remarque / Osservazione

Einige Stauwehre, die der Talsperrenverordnung aus militärischen Gründen ebenfalls unterstellt sind, figurieren nicht in der Liste.

Les quelques barrages-vannes soumis au règlement des barrages pour des raisons militaires ne sont pas mentionnés.

Gli sbarramenti fluviali a paratoie, sottomessi all'ordinanza sugli sbarramenti per ragioni militari, non sono menzionati.