

Zeitschrift:	Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
Herausgeber:	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band:	64 (1972)
Heft:	5
Artikel:	Pumpspeicherwerke als Ergänzung für Nuklearkraftwerke
Autor:	Fry, Peter Frederick / Gabler, Wolfgang E. / Hartmann, Otto
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-920962

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: 08.02.2026

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

Die Wirtschaftlichkeit jedes Pumpspeicherprojektes kann deshalb getrennt untersucht werden. Die Methode ist allgemein die gleiche wie die für mit Nachbarsystemen verbundenen Projekte, und sie verlangt die Beurteilung der Kostendifferenz zwischen zugeführter und abgegebener Energie, die erreicht werden muss, um das Projekt wirtschaftlich akzeptierbar zu machen.

Die Bestimmung der präzisen Kosten der zugeführten Energie und des Preises der abgegebenen Energie ist normalen kommerziellen Verhandlungen zwischen den betreffenden Elektrizitätsgesellschaften unterworfen.

Gegenwärtig betragen die Kosten typischer Pumpspeicheranlagen für die in der Schweiz bestehenden Bedingungen ungefähr 450 bis 650 SFr. per kW installierter Leistung. Mit Jahreskosten von zum Beispiel 53 SFr. per kW und einer Benutzungsdauer von 1500 Stunden pro Jahr kommt die Differenz zwischen zugeführter und abgegebener Energie auf etwa 3,5 Rp./kWh. Die Kosten der Pumpenenergie können grossen Schwankungen unterliegen und sind wesentlich von der Energiequelle abhängig; es ist deshalb nicht möglich, einen allgemeinen Preis für Pumpspeicher gelieferte Spitzenenergie anzugeben.

Unter Annahme eines Preises für Bandenergieüberschüsse von 2,5 Rp./kWh und einem Umwandlungswirkungsgrad von 71,5 % könnte dann eine kWh Spitzenenergie für 7,0 Rp. produziert werden. Diese Zahl ist günstig, verglichen mit gegenwärtigen Produktionskosten thermischer Spitzenenergiewerke, die mit einem Kapitalaufwand von 610 SFr. per installiertes kW, festen Jahreskosten von 70 SFr. per kW, einem Brennstoffpreis von 15.70 SFr. per Fass (10.90 SFr. per Million kcal) und einer jährlichen

Benutzungsdauer von 1500 Stunden, einen Preis von 10,10 Rappen per gelieferte kWh ergeben. Daraus kann man schliessen, dass Pumpspeicher in der Schweiz vorteilhafte wirtschaftliche Erwartungen erfüllen sollten.

Schlussfolgerungen

Die grossen hydraulischen Speicheranlagen der Schweiz — natürliche und pumpenunterstützte, saisonäre und kurzfristige — können jetzt ungefähr 20 % des gesamten Bedarfes an regulierbarer Energie im westeuropäischen Verbundnetz liefern. Aber die Möglichkeiten, weitere auf natürlichen Zuflüssen basierte Speicherwerke zu bauen, gehen der Erschöpfung entgegen. Die Topographie und die zentrale Lage der Schweiz im europäischen Verbundnetz begünstigt die Entwicklung der Pumpspeicher. Einerseits können diese Nachtenergieüberschüsse aufnehmen, die wahrscheinlich wachsend von verschiedenen Quellen verfügbar werden. Anderseits können Pumpspeicher, die für einen täglichen oder wöchentlichen Arbeitsmodus konzipiert sind, dem schweizerischen System die Gelegenheit geben, zu dem westeuropäischen Bedarf an regulierbarer Energie einen grösseren Beitrag zu leisten. Es ist deshalb zu erwarten, dass das Planen und der Bau von Pumpspeicheranlagen in der Schweiz in den nächsten Jahren von erheblicher Bedeutung werden wird.

Adresse des Verfassers:

Dipl. Ing. K. Goldsmith,
Elektro-Watt, Ingenieurunternehmung AG,
CH-8022 Zürich

PUMPSPEICHERWERKE ALS ERGÄNZUNG FÜR NUKLEARAKTWERKE

Peter Frederick Fry, Wolfgang E. Gabler, Otto Hartmann

DK 621.221.4 : 621.311.25

1. Einleitung

Mit den siebziger Jahren hat für die Schweiz das «Atomzeitalter» begonnen. Beznau I, das erste Nuklearkraftwerk, ging Ende 1969 in Betrieb, Beznau II folgte Ende 1971, Mühleberg (verspätet) wird in der zweiten Hälfte 1972 folgen, und andere Anlagen befinden sich in verschiedenen Stadien der Planung und Vorbereitung (Tabelle 1). Wie aus Bild 1 hervorgeht, sind die Wasserkräfte im wesentlichen ausgebaut und Atomkraftwerke werden den künftigen Zuwachs darstellen. Der nukleare Anteil an installierter Leistung wird 1976 etwa einen Viertel erreichen und etwa einen Drittel des Energiebedarfes decken [1, 2].

Dieser Wandel in der Zusammensetzung der Produktionsanlagen hat Auswirkungen auf den Netzbetrieb. Die heutigen Nuklearkraftwerke sind aus technischen und wirtschaftlichen Gründen im wesentlichen Grundlast-Kraftwerke. Die vorhandenen hydraulischen Speicherwerkwerke werden zwar bis auf weiteres in der Lage sein, den Spitzenbedarf zu decken, so dass erst in den achtziger Jahren, wie verschiedene Untersuchungen gezeigt haben, zusätzliche Spitzenkapazität wird installiert werden müssen. Da die natürlichen Speichermöglichkeiten weitgehend ausgebaut sind, wird es sich hierbei überwiegend um Pumpspeicherwerke handeln. Verschiedene Stellen haben in der

Vergangenheit die Möglichkeiten für Pumpspeicheranlagen in der Schweiz studiert. Ueber das Ergebnis dieser Untersuchungen wird eine im Herbst 1972 erscheinende Veröffentlichung des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft orientieren [3].

Einer der untersuchten Standorte ist besonders bemerkenswert wegen seiner günstigen Lage zu den Nuklearkraftwerken:

Das Pumpspeicherprojekt Herbetwil liegt innerhalb des «nuklearen Halbkreises», welchen die in Planung und Bau fortgeschrittenen Nuklearkraftwerkprojekte entlang Aare und Rhein bilden (Bild 2). Dieses Gebiet deckt sich auch mit den demographischen und industriellen Zentren des Landes. Die Oertlichkeit Herbetwil ist insofern höchst vorteilhaft, als sie die Mehrzahl der Nuklearkraftwerke in einem Radius von 60 km einschliesst. Mit 1090 MW installierter Leistung wird Herbetwil in der Lage sein, als Momentanreserve die volle Leistung jedes dieser Nuklearkraftwerke zu ersetzen, wenn auch nur für eine begrenzte Zeitspanne. Die Möglichkei-

[3] Hinweis auf Literatur am Schluss dieses Berichts

Tabelle 1: Stand schweizerischer Kernkraftwerke, Sommer 1971

ANLAGE	EIGENTÜMER	ORT	TYP	LEISTUNG (MW _{el})	STAND (SOMMER 1971)
Beznau I	NOK	11 km nordwestlich von Baden an der Aare	W-PWR	350	in Betrieb seit Oktober 1969
Beznau II	NOK	wie Beznau I	W-PWR identisch mit Beznau I	350	vorgesehen für Betriebsaufnahme Ende 1971, Brennstoffladungsbeginn Juli 1971
Mühleberg	BKW	13 km westlich von Bern an der Aare	GE-BWR	310	vorgesehen für Betriebsaufnahme September 1972
Kaiseraugst	ENK	10 km östlich von Basel am Rhein	GE-BWR	840	geplant für Inbetriebsetzung 1975, verzögert wegen Umweltschutz
Leibstadt	KKW-Leibstadt	50 km östlich von Basel am Rhein	BWR oder PWR	800	Offertausschreibung
Gösgen	KKW-Gösgen	an der Aare zwischen Olten und Aarau	BWR oder PWR	in der Größenordnung von 600 bis 700	Offertausschreibung
Verbois	EOS und Partner	westlich von Genf an der Rhone	noch nicht bestimmt	800	Standortuntersuchungen, Betriebsaufnahme vorgesehen anfangs 1980
Graben	BKW	40 km nordöstlich des Bielersees an der Aare	BWR oder PWR	keine Auskunft erhältlich	Standortuntersuchungen, Betriebsaufnahme vorgesehen 1980
Rüthi	NOK	24 km südlich des Bodensees am Rhein	BWR oder PWR	600	Keine Auskunft erhältlich

W-PWR = Westinghouse-Druckwasserreaktor

GE-BWR = General-Electric-Siedewasserreaktor

ten des Zusammenspiels zwischen der Pumpspeicheranlage und den benachbarten fünf grossen Nuklearkraftwerken werden nachstehend diskutiert im Hinblick auf den Betrieb der Nuklearanlagen, den Einsatz des Pumpspeicherwerkes als Momentanreserve und die Auswirkungen auf die Stabilität und Zuverlässigkeit des Gesamtnetzes.

2. Anlagebeschreibung

Die folgende Beschreibung der Pumpspeicheranlage und der nuklearen Kraftwerke beschränkt sich im wesentlichen auf das Regelverhalten sowie auf die Anfahr- und Abstell-eigenschaften.

2.1 DIE PUMPSPEICHERANLAGE

Das Unterbecken ist im Dünnerg-Tal in der Nähe des Ortes Herbetswil vorgesehen, das Oberbecken auf dem 440 m darüber liegenden Plateau der Schmidematt. Beide Becken sollen einen Inhalt von 6,1 Mio m³ erhalten, was vier Stunden Vollast-Turbinendurchfluss entspricht plus eine Stunde Turbinen-Vollast als Notreserve. In Tabelle 2 ist zusammengestellt, für welche Zeitspanne das Pumpspeicherwerk die Leistung der einzelnen Atomkraftwerke ersetzen könnte, ausgehend einmal von vollem Oberbecken, zum anderen von der Notreserve.

Alle Wasserführungen und das Krafthaus sind unterirdisch angeordnet. Die gegenwärtige Projektkonzeption basiert auf sechs Einheiten von je 200 MW, angeordnet in zwei Gruppen von je drei Einheiten, deren jede mit ihrem eigenen Druckschacht mit dem Oberbecken bzw. einem Unterwassertunnel mit dem unteren Becken verbunden ist.

Diese Auslegung nimmt auf einen stufenweisen Ausbau Rücksicht, das heisst, die zweite Hälfte der Anlage ist unabhängig von der ersten und kann einige Zeit später realisiert werden. Es sind Pumpenturbinen üblicher Bauart mit Leitapparaten für Lastregulierung im Turbinenbetrieb vorgesehen. Für Phasenschieberbetrieb und Pumpenanlauf wird das Laufrad mittels Druckluft entwässert. Für den Anlauf im Pumpenbetrieb sind im gegenwärtigen Projekt Anwurfmotoren vorgesehen. Es ist aber zu erwarten, dass statische Frequenzwandler-Systeme [4] innerhalb der nächsten Jahre entwickelt und Betriebsreife erlangen werden, welche es erlauben würden, Einheiten dieser Grösse auch mit wassergefülltem Laufrad im Pumpenbetrieb hochzufahren. Dies würde erheblich schnelleren Anlauf im Pumpenbetrieb ermöglichen. Druckschächte und Unterwassertunnels, mit einem Wasserschloss auf der Unterwasserseite der Zentrale, sind so dimensioniert, dass 100 % Laständerung in 33 Sekunden innerhalb der zulässigen Druckstossbegrenzungen möglich sind. Tabelle 3 gibt die wesentlichen Anlauf- und Umschaltzeiten der Pumpspeicheranlage. Bilder 3 bis 7 zeigen die Situation, den geologischen Längsschnitt und Fotomontagen der geplanten Anlage.

2.2 DIE NUKLEAREN KRAFTWERKE

Wie aus der Spalte «STAND» in Tabelle 1 hervorgeht, befinden sich die meisten dieser Anlagen gegenwärtig in Planung und spezifische Einzelheiten der Ausrüstung sind deshalb nicht bekannt. Im Zuge der Planung wurden jedoch gewisse Entscheidungen getroffen für Typ, Grösse und allgemeine Auslegung der Anlagen, wodurch Rück-

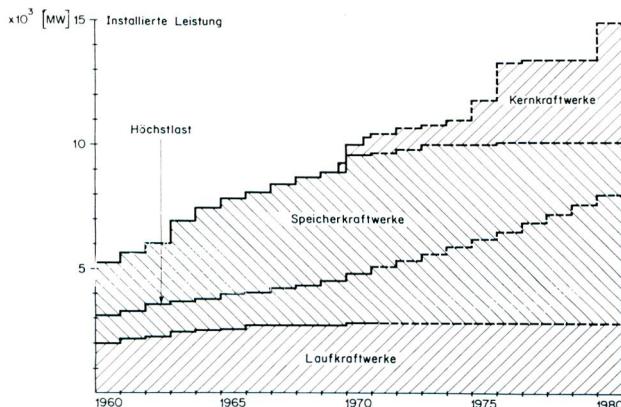


Bild 1 Entwicklung der schweizerischen Energieerzeugungsanlagen

schlüsse auf das transiente Verhalten möglich sind. Die bis heute gebauten und bestellten Nuklearkraftwerke benützen Leichtwasserreaktoren und mit grösster Wahrscheinlichkeit wird dies auch für die gegenwärtig in Planung befindlichen zutreffen. Die beiden Bauarten — Siede- und Druckwasserreaktor — zeigen Unterschiede im transienten Verhalten, die im Einzelfall auch noch vom Hersteller und vom Konstruktionszeitpunkt abhängen. Die Angaben in Bild 8 und Tabelle 4 stellen deshalb vereinfachte und generalisierte Werte dar, die jedoch ein gutes allgemeines Bild über das transiente Verhalten der wesentlichen Reaktortypen vermitteln.

Wie man sieht, kann der BWR (Siedewasserreaktor) steilere Lastgradienten fahren, während der PWR (Druckwasserreaktor) grössere Lastsprünge bewältigt infolge der als Wärmespeicher wirkenden Dampferzeuger. Es scheint daher, dass Druckwasserreaktoranlagen etwas besser geeig-

net sind, an der Frequenzregelung teilzunehmen. Allerdings sind einige BWR-Anlagen gegenwärtig im Bau, die ebenfalls mit Rücksicht auf Teilnahme an der Frequenzregelung so ausgelegt sind, dass sie Lastsprünge von $\pm 10\%$ der Nennlast vertragen und darüber hinaus mit einem Gradienten von 10 % pro Minute den Laständerungen folgen können.

Beide Systeme können sich den langsamen täglichen Laständerungen anpassen. Der PWR kann im Bereich von 60 bis 100 % Nennlast allein durch Kontrollstabbewegung geregelt werden. Ausserhalb dieses Bereiches können tiefere Lasten nur während einer begrenzten Zeit gefahren werden, weil sonst die Borkonzentration im Kühlmittel verändert werden muss, was entweder höhere Anlagekosten oder gewisse betriebliche Einschränkungen zur Folge hat. Der BWR hingegen kann jeder Laständerung folgen innerhalb eines grossen Betriebsbereiches durch Veränderung des Kühlmitteldurchflusses und der Kontrollstäbe.

Beide Bauarten zeigen gewisse Einschränkungen gegen das Ende des Brennstoffzyklus. Diese sind in Bild 9 für einen PWR dargestellt, würden aber ebenso zutreffen für BWR-Anlagen, deren Kontrollstäbe in Gruppen statt einzeln verstellt werden, was eine entsprechende Zeitersparnis beim Start ergibt. Diese Beschränkung ist eine Folge der Xenonvergiftung, welche gegen Ende des Brennstoffzyklus nicht mehr voll durch Ueberschussreakтивität ausgeglichen werden kann. Hier treten also zusätzliche Verzögerungen im Wiederanfahren nach einer Reaktorabschaltung auf.

Die Abschaltung des Reaktors im Falle einer Netzborschaltung (Lastabwurf) kann bei modernen Anlagen vermieden werden durch eine Kombination von Sicherheitsventilen und schnellansprechenden Turbinen-Bypassventilen. Dabei wird beim BWR der radioaktive Dampf in den Druckentlastungsbehälter innerhalb des Sicherheitsbehäl-

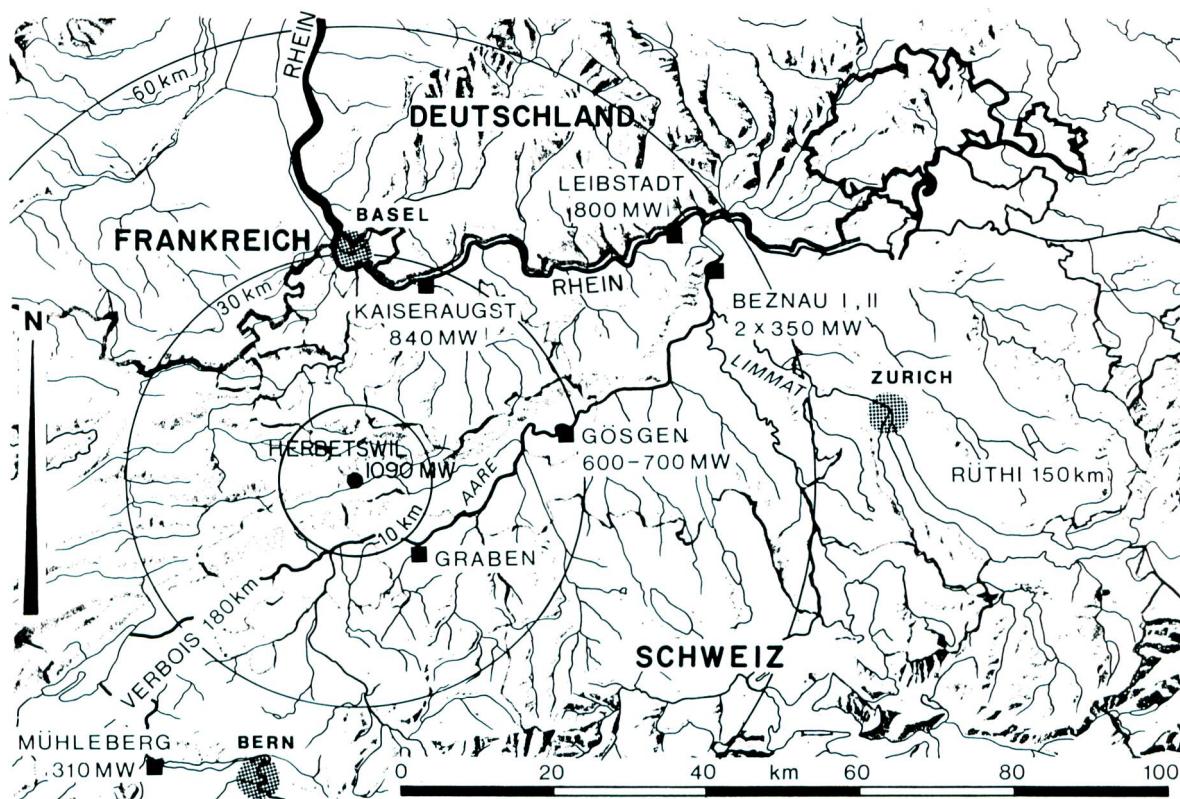


Bild 2 Lageplan des Pumpspeicherwerkes Herbetswil und der schweizerischen Kernkraftwerke.

Tabelle 2: Dauer während welcher das Pumpspeicherwerk die volle Leistung der verschiedenen Kernkraftwerke ersetzen könnte

KERNKRAFTWERK	BEZNAU	MÜHLEBERG	KAISETAUGST	LEIBSTADT	GOSGEN	VERBOIS	RÜTHI
Leistung (MW _{el})	700	310	840	800	600—700	800	600
Einsatzzeit (h) bei vollem Oberbecken	6,2	14,1	5,2	5,5	6,2—7,3	5,5	7,3
Notreserve	1,56	3,5	1,34	1,36	1,56—1,8	1,36	1,8

Tabelle 3
Anlauf- und Umschaltzeiten von Pumpspeicherwerken

Stillstand bis Vollast Turbine	1,5—2 min
Stillstand bis Vollast Pumpe	~ 10 min
Vollast Pumpe bis Vollast Turbine	2—3 min
Vollast Turbine bis Vollast Pumpe	~ 12 min
Laständerungsgeschwindigkeit 200 %/min ohne Begrenzung	
Bemerkung: Pumpenanlaufzeiten mit Anwurfmotor, Laufrad entwässert	

ters abgeblasen, während beim PWR der Dampf in die Atmosphäre abgeblasen wird. Nach einer kurzen Zeitspanne wird aller Dampf über den Turbinen-Bypass in den Kondensator geleitet und die Sicherheitsventile werden geschlossen. Gleichzeitig wird die Reaktorleistung automatisch mit der maximal zulässigen Reguliergeschwindigkeit zurückgefahren (im Gegensatz zum Reaktor-Scram, der Not- oder Schnellabschaltung). Es wird berichtet [6], dass ein BWR in 10 Sekunden von 100 auf 60 % zurückgefahren werden kann, während ein PWR nach einem Lastsprung von 10 % lediglich 5 % pro Minute Lastreduktion vornehmen kann, was auch der zulässigen Laständerungsgeschwindigkeit der Dampfturbinen etwa entspricht. Bei Netzabschaltung wird also auf die geschilderte Weise kontrolliert die Leistung zurückgenommen bis sie der Deckung des Eigenbedarfes entspricht. Von diesem Zustand aus kann Vollast wieder in etwa einer Stunde erreicht werden.

2.3 DAS NETZ

Da die zukünftige Entwicklung des Hochspannungsnetzes im einzelnen nicht bekannt ist, mussten Annahmen getroffen werden. Da es sich um vergleichsweise geringe Entfernung handelt, wurde vorausgesetzt, dass das Pumpspeicherwerk über zwei getrennte Hochspannungsleitungen (eine nach Norden zum Netzknotenpunkt Laufenburg, eine nach Osten zum Netzknotenpunkt Gösgen) mit den Nuklearkraftwerken und dem allgemeinen Hochspannungsnetz verbunden würde, was eine bezüglich der Leitungen sehr hohe Zuverlässigkeit ergeben würde. Für das west-europäische Verbundnetz gelten gegenwärtig folgende Kennzahlen [5]:

Gesamte installierte Leistung	100 GW	(1 GW = 10 ³ MW)
Höchstlast	82 GW	
Leistungszahl	12 GW/Hz	

Aus diesen Zahlen folgt, dass die Abschaltung eines Nuklearkraftwerkes von etwas weniger als 1000 MW den Verlust von weniger als 1 % der total zusammengeschlossenen Last darstellt und zu einer Frequenzabsenkung von

weniger als 1/10 Hz führen würde. Während dies für das gesamte Verbundsystem gilt, ist jedoch jedes Untersystem wie das schweizerische Netz gehalten, seine eigenen Lastschwankungen auszuregulieren und in seinem Teilnetz so rasch als möglich wieder den Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch herzustellen — plus oder minus ver einbarte Austauschleistung nach oder von anderen Partnern. Dies ist nötig, um Ueberlastung der Verbundleitungen und Transformatoren zu vermeiden und um einen stabilen und wirtschaftlichen Netzbetrieb sicherzustellen. Es ist deshalb vernünftig, für die folgenden Ausfall-Untersuchungen das Schweizer Netz als isoliertes Netz anzusehen, obwohl es tatsächlich mit dem westeuropäischen System verbunden ist, welches im ersten Augenblick Ausgleichsenergie zur Verfügung stellt.

3. Störungsfälle in der Nuklearanlage

Die verschiedenen Fälle unterscheiden sich einerseits hinsichtlich der Ausgangssituation im Netz und in der Pumpspeicheranlage, andererseits hinsichtlich der Ursache der Störung in der nuklearen Anlage.

3.1 VOR DER STÖRUNG

Die Situation vor der Störung ist massgebend für die notwendigen Leistungsreserven, welche zur Lastdeckung zur Verfügung gestellt werden müssen in Abhängigkeit von Art und Dauer der Störung. Für diese Studie wurden gewisse Annahmen zugrunde gelegt:

- die Nuklearanlagen arbeiten mit 90 % Last, das heisst 10 % der Nennlast sind frei als Reserve
- die Störung tritt zu irgendeiner Zeit während der Starklastzeit (8.00 bis 18.00 Uhr) auf, da dies die kritische Phase des Tages ist
- die Pumpspeicheranlage ist mit einer durchschnittlichen Leistung von 54 % der Nennleistung belastet, das heisst 46 % oder 500 MW sind frei als Reserve.

Die Energiereserve, welche in der Pumpspeicheranlage verfügbar ist, ist am grössten am Morgen bei gefülltem Oberbecken, wenn der Turbinenbetrieb beginnt, und erreicht ihr Minimum — die Notreserve — am Abend, wenn die Pumpperiode beginnt. Dies erscheint aber akzeptabel, weil die Zeitspanne, während welcher Reserveleistung zur Verfügung gestellt werden muss, ebenfalls abnimmt; am Abend geht die Last um mehr zurück als der ausgefallenen Leistung des Nuklearkraftwerkes entspricht, und deshalb sind jeweils nur die verbleibenden Starklaststunden kritisch. Die Schwachlastzeit wird nicht als kritisch angesehen, da man annimmt, dass genügend Leistung durch Abschalten der Pumpen freiemacht werden kann.

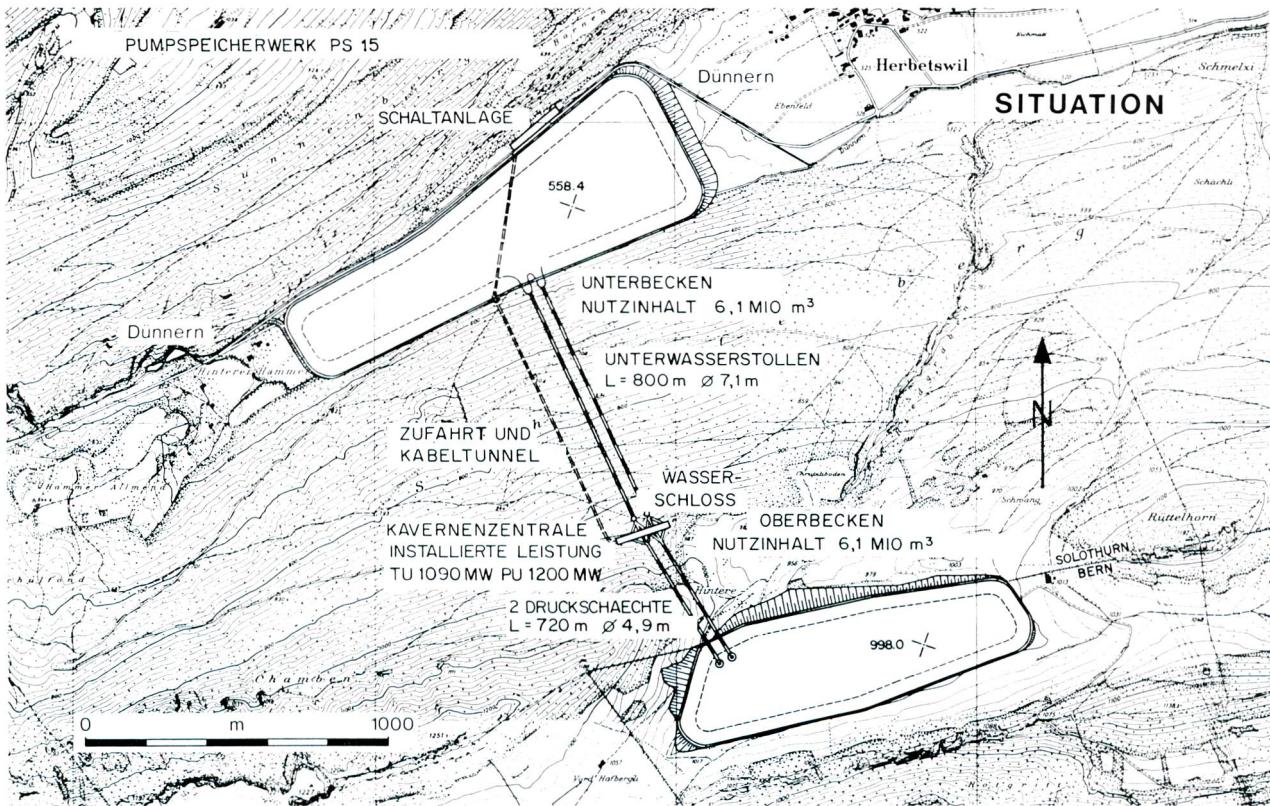


Bild 3 Lageplan des Pumpspeicherwerks Herbetswil

3.2 DIE STÖRUNG UND DIE ROLLE DES PUMPSPEICHERWERKES

Auch bei geplanter Abstellung eines Nuklearkraftwerkes oder einer anderen Erzeugungsanlage kann ein Pumpspeicherwerk ein wertvolles Hilfsmittel für den Lastverteiler darstellen. Wir betrachten aber eine solche Abstellung nicht als kritisch, da sie vorher bekannt ist und entsprechende Massnahmen getroffen werden können. Im Sinne der Momentanreserve sind nur unvorhergesehene Ausfälle von Interesse, das heißt Abschaltungen, die jederzeit ohne vorherige Warnung auftreten können. Sie werden verursacht durch Störungen entweder innerhalb des Nuklearkraftwerkes (innere Störungen) oder ausserhalb der Anlage im Uebertragungssystem (äussere Störungen) und werden ausgelöst durch eine automatisch wirkende Schutzeinrichtung.

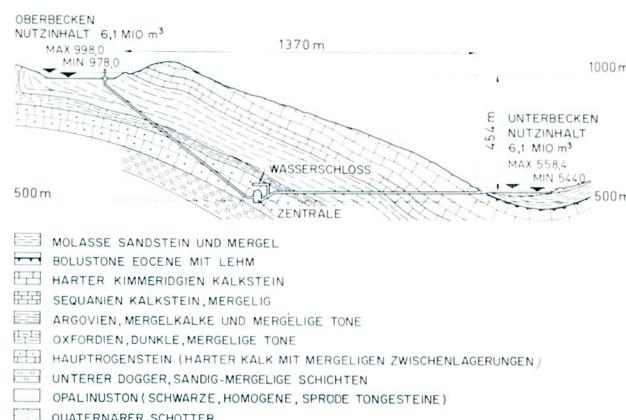


Bild 4
Geologischer Längsschnitt der Pumpspeicheranlage Herbetswil.

Im Falle der inneren Störung muss das Pumpspeicherwerk die ausgefallene Leistung ersetzen. Dabei ist wesentlich, dass das Pumpspeicherwerk in etwa 2 Minuten vom Stillstand aus volle Leistung erreichen kann. Dies entspricht einer durchschnittlichen Laststeigerung von 50 % pro Minute, was erheblich besser ist als die Laständerungsgeschwindigkeit von Nuklearanlagen in ihrem normalen Betriebsbereich. Die Wirkung eines Pumpspeicherwerkes kann deshalb als gleichwertig betrachtet werden der «drehenden Reserve» von thermischen Kraftwerken, sogar bei Stillstand.

Ist der Schaden von solcher Art, dass das Nuklearkraftwerk innerhalb etwa einer Stunde den Betrieb wieder aufnehmen kann, wird das Pumpspeicherwerk diese Zeit lediglich überbrücken und keine anderen Massnahmen werden zu treffen sein. Bei Ausfällen von längerer Dauer übernimmt das Pumpspeicherwerk die ausgefallene Leistung ebenfalls im ersten Augenblick und für die folgende Zeit bis zu etwa einer Stunde. Dafür reicht die Energiereserve im Oberbecken auf jeden Fall. Während dieser Zeit wird der Lastverteiler in der Lage sein, Ursache und Auswirkungen des Ausfalles auf die Verfügbarkeit der Nuklearanlage festzustellen. Entsprechend dieser Informationen wird er dann andere Erzeugungsanlagen einsetzen und damit die Pumpspeicheranlage entlasten und allmählich zu ihrer normalen Funktion zurückführen.

Im Falle von äusseren Störungen kann das Pumpspeicherwerk den Netzbetrieb verbessern und unterstützen, indem es die ausgefallene Belastung ersetzt. Wie in Abschnitt 2 erläutert, brauchen nukleare Kraftwerke etwa eine Stunde, um von der Laststufe Eigenbedarf wieder volle Leistung zu erreichen, während es vom Standpunkt des Netzbetriebes gesehen höchst wünschbar ist, die volle Leistung wieder zur Verfügung zu haben, sobald die Stö-

Bild 5
Blick vom Dorfe Herbetswil nach Westen auf das Unterbecken
(Fotomontage Eidg. Amt für Wasserwirtschaft)



rung im Uebertragungssystem behoben ist. Die Leistungsaufnahme des Pumpspeicherwerkes im Pumpbetrieb reicht aus, um für die betrachteten Nuklearkraftwerke eine künstliche Belastung von etwa 30 % der Nennlast herzustellen. Damit können die Nuklearkraftwerke im normalen Betriebsbereich gehalten werden, bereit für sofortige Lastaufnahme [7]. Für diesen Betriebsfall ist es wichtig, dass die Pumpen so schnell als möglich angefahren werden können. Anfahrzeiten in der Größenordnung von 10 bis 15 Minuten sind heute üblich für Start mit Anwurfmotor und entwässertem Laufrad, doch sind hier wesentliche Verbesserungen in der Zukunft zu erwarten. In ähnlicher Weise kann das Pumpspeicherwerk — wiederum im Pumpbetrieb — benutzt werden, um dem System eine künstliche Vorbelastung aufzuprägen wenn — besonders während der Schwachlastzeit — starke Lastanstiege erwartet werden (zum Beispiel nach populären Fernsehsendungen während der Nacht).

4. Wirtschaftliche Ueberlegungen

Die Kosten für die Zurverfügungstellung von Momentanreserve mittels eines Pumpspeicherwerkes werden gegenübergestellt den entsprechenden Kosten, welche bei Einsatz anderer Mittel entstehen, um die gleiche Gesamtzuverlässigkeit des Netzes ohne Pumpspeicherwerke herzustellen. Erfahrungsgemäss liegt die Verfügbarkeit von Hochdruck-Speicherkraftwerken und Pumpspeicheranlagen in der Größenordnung von 97 bis 100 %, weshalb kein Abzug gemacht zu werden braucht für die Verfügbarkeit des Pumpspeicherwerks selbst. Ebenso werden die Verbindungsleitungen zum Hochspannungsnetz als 100 % verfügbar angesehen, da zwei unabhängige Leitungen vorausgesetzt werden.

Da der Einsatz als Momentanreserve recht selten vorkommen wird, ist es berechtigt, für diese Fälle die Brennstoffkosten und (für die Pumpspeicheranlage) die Kosten für

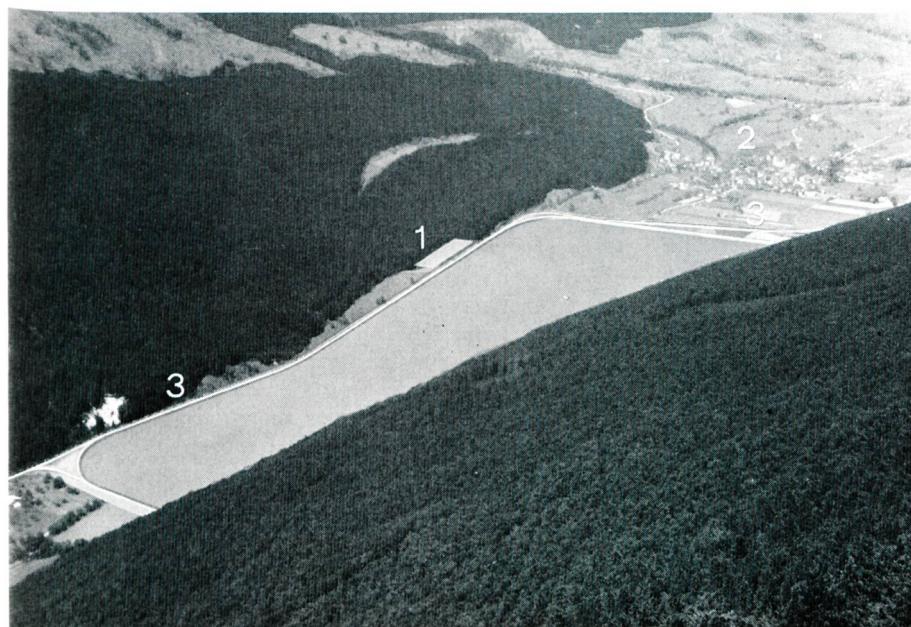


Bild 6
Blick vom Rande des Oberbeckens auf das Unterbecken
1. Freiluft-Schaltanlage
2. Herbetswil
3. Umleitung des Dünnerg-Baches
(Fotomontage Eidg. Amt für Wasserwirtschaft)

Tabelle 4: Lastfolgevermögen von Druckwasser- und Siedewasserreaktoren

	DRUCKWASSER-REAKTOR (PWR)		SIEDEWASSER-REAKTOR (BWR)
Lastfolgevermögen			
bei Kontrollstabregelung	0—30 %	30—100 % Laständerung	
Moderne Konstruktion	5 %/min	15 %/min	10 %/min
Ältere Konstruktion	5 %/min		5 %/min
bei Reaktor-Kühlmittelregelung	nicht vorhanden		60 %/min über einen Bereich von 35 % der Maximallast
Lastfolgevermögen bei Laständerungen grösser als 100 bis 60 %	In der Zeit begrenzt oder Aenderung der Bor-Konzentration notwendig		Nicht zeitbegrenzt
Spezielle Lastfolge-Charakteristik	Geeignet für Netzfrequenzhaltung		Geeignet für Betrieb als Spitzenlastkraftwerk

Bemerkung: Lastfolgevermögen gegen Ende des Brennstoffzyklus begrenzt durch Reaktivität

die Pumpenergie zu vernachlässigen und für den Vergleich lediglich die festen jährlichen Kosten heranzuziehen. Wir vergleichen also den im Durchschnitt als Momentanreserve zur Verfügung stehenden Leistungsanteil des Pumpspeicherwerkes, 500 MW, mit 500 MW nuklearer Leistung, welche zusätzlich installiert werden müsste als Momentanreserve, wenn das Pumpspeicherwerk nicht vorhanden wäre. Wiederum wird nur der Einsatz als Momentanreserve betrachtet, getrennt von der üblichen ökonomischen Evaluation eines Pumpspeicherwerkes in Zusam-

menarbeit mit nuklearen Kraftwerken. Damit sind die massgebenden Kosten weitgehend durch die Kapitalinvestition gekennzeichnet und der wirtschaftliche Vergleich wird sehr einfach.

Die Anlagekosten für das Pumpspeicherwerk Herbetswil werden auf 460 Mio Franken geschätzt (einschliesslich der allgemeinen Kosten für Planung und Bauleitung, Erwerb von Land und Rechten, Steuern, Bauzinsen usw.) plus 40 Mio Franken für die Uebertragungsleitungen, total also 500 Mio Franken. Dies ergibt einen Wert von 460 Franken pro kW und die anteiligen Kosten für 500 MW wären 230 Mio Franken. Auf der selben Kostenbasis (1969) ergeben sich für Nuklearkraftwerke Anlagekosten zwischen 880 und 1000 Franken pro kW. Die entsprechende Investition für 500 MW würde dann 440 bis 500 Mio Franken betragen. Mit einem Pumpspeicherwerk lässt sich also die notwendige Momentanreserve verwirklichen mit einer Einsparung von rund 200 bis 280 Mio Franken, verglichen mit den Kosten für dieselbe Momentanreserve auf nuklearer Basis.

5. Schlussfolgerungen

Ein Pumpspeicherwerk, welches in enger Verbindung mit einer Gruppe von nuklearen Kraftwerken installiert wird, kann sehr wirkungsvoll als Momentanreserve dienen. Bei rund 4000 MW totaler installierter nuklearer Leistung mit 10 % Reservekapazität stehen 400 MW als Momentanreserve zur Verfügung. Dies bedeutet, dass ein Reserveanteil von 500 MW im Pumpspeicherwerk genügt, um die 840 MW des grössten schweizerischen Nuklearkraftwerkes im Störungsfall zu ersetzen. Mit einem Energieinhalt der Pumpspeicherbecken entsprechend fünf Stunden Turbinen-Vollast (vier Stunden Normalbetrieb plus eine Stunde Notreserve) ist das Pumpspeicherwerk in der Lage, diese 500 MW zu jeder Zeit während der Starklast- und Schwachlaststunden für eine genügend lange Zeitspanne bereitzustellen, die entweder das Wiederanfahren der Nuklearanlage erlaubt oder, falls der aufgetretene Schaden dies verhindert, innerhalb des schweizerischen und notfalls europäischen Verbundnetzes entsprechende Reserveleistung bereitzustellen. Im Pumpspeicherwerk kann diese Momentanreserve mit niedrigeren Investitionen realisiert werden als in nuklearen Kraftwerken. Dies erlaubt im betrachteten Kraftwerkssystem Einsparungen in der Größenordnung von 200 bis 280 Mio Franken.



Bild 7 Luftbild des Oberbeckens Schmidematt (Fotomontage Eidg. Amt für Wasserwirtschaft).

Bei Störungen im Uebertragungssystem kann das Pumpspeicherwerk durch Einschalten der Pumpen die Nuklearanlagen mit etwa 30 % der Nennlast beladen. Aus diesem Zustand heraus können diese wesentlich schneller wieder Last übernehmen, als wenn sie auf die Deckung des Eigenbedarfes zurückgeregelt werden müssten.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Speicherseen der Alpen
Sonderheft «Wasser- und Energiewirtschaft» 9/1970
- [2] Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
59. Jg., Nr. 15, p. 702ff
- [3] Pumpspeichermöglichkeiten in der Schweiz
Mitteilung Nr. 46 des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft, Bern/Schweiz (erscheint im Herbst 1972)
- [4] T. Petersson, K. Frank
«Starting of large synchronous motor using static frequency converter»
IEEE Transactions Paper No. 71 TP 519-PWR, 1971
- [5] Jahresbericht der Union für die Koordinierung der Erzeugung und des Transportes elektrischer Energie
UCPTE 1969-1970
- [6] P. Carbon, W. Stephan, AEG-Telefunken
«Operating and load-following performance of a boiling-water reactor power plant»
IAEA-SM-139/11
- [7] G. Lenssen
Allgemeine und einige spezielle Netzbelastungsfälle und ihre Bewältigung durch ein Pumpspeicherwerk
Die Wasserwirtschaft 4 (1970)

Adresse der Verfasser:
P. F. Fry, W. E. Gabler und O. Hartmann,
Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG
CH-5400 Baden

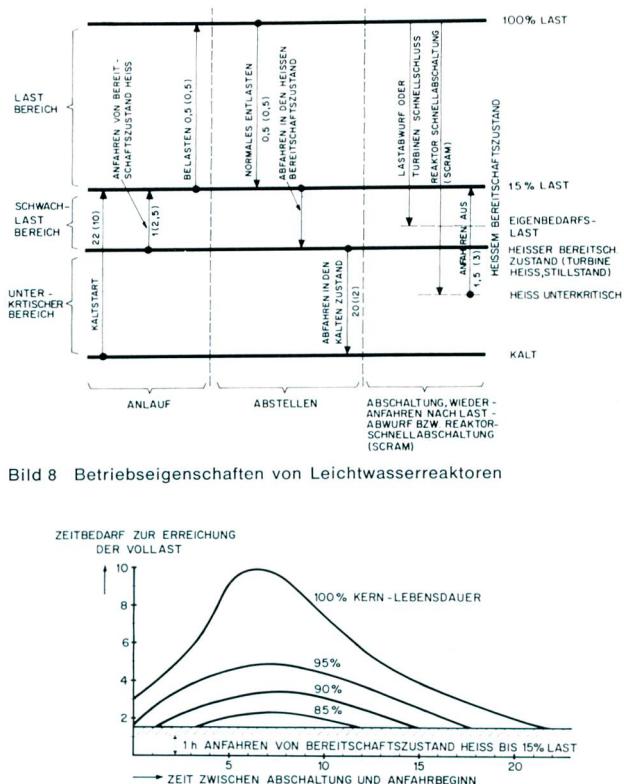


Bild 8 Betriebseigenschaften von Leichtwasserreaktoren

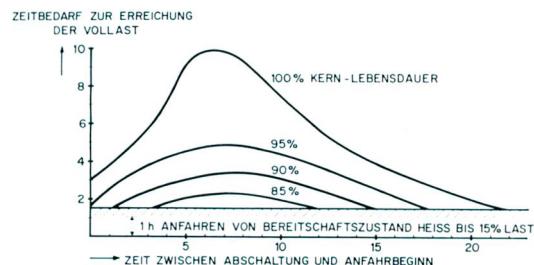


Bild 9 Zeit zum Erreichen der Vollast nach Abschaltung auf Null gegen Ende des Brennstoffzyklus unter Berücksichtigung der Xenonvergiftung.

EINWEIHUNG DER KRAFTWERK- UND PUMPSPEICHERANLAGE HONGRIN-LEMAN

Gian Andri Töndury

DK 621.221+621.221.4

Am 21. April 1972 — einem der wenigen Schönwettertage des Monats — fand bei einem Aufmarsch von rund 250 Geladenen die Einweihung der Kraftwerk- und Pumpspeicheranlage Hongrin-Léman statt. Ueber diese bedeutende Wasserkraftanlage haben wir bereits 1966 in unserer Zeitschrift eingehend berichtet¹, und am 9. September gleichen Jahres wurde — verbunden mit der Hauptversammlung des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes — eine ganz-tägige Exkursion zur interessanten Baustelle der doppelten Bogenstaumauer durchgeführt².

Bereits 1944 hatten im Hinblick auf die interkantonale Konzessionerteilung für die Wasserkraftnutzung des Hongrin und einiger Zuflüsse Verhandlungen zwischen den Kantonen Freiburg und Waadt begonnen. Hauptproblem war dabei die mit der Nutzung Richtung Genfersee erforderliche Ableitung von natürlichen Zuflüssen des Einzugsgebietes des Rheins in das Abflussgebiet der Rhone. Erst im Jahre 1963 konnte schliesslich die Gesellschaft Forces Motrices Hongrin-Léman S.A. (FMHL) gegründet werden. Die Gesellschaft mit einem Aktienkapital von 70 Mio Fr. umfasst heute folgende fünf Partner:

	Beteiligung
— S.A. de l'Ouest Suisse (EOS) mit	30,0 %
— Compagnie Vaudoise d'Electricité (CVE)	24,8 %
— Entreprises Electriques Fribourgeoises (EEF)	9,2 %
— Société Romande d'Electricité (SRE)	4,0 %
— Commune de Lausanne	2,0 %

Die Wasserkraftanlage (Lageplan siehe Bild 2) umfasst folgende Hauptbauwerke:

- das obere, natürlich 45,6 km² umfassende Einzugsgebiet des Hongrin mit fünf verschiedenen 45,2 km² erfassenden 21,25 km langen Bachzuleitungen und der durch eine 125 bzw. 90 m hohe Doppel-Bogenstaumauer geschaffene Speichersee Hongrin mit einem Nutzhalt von 52,1 Mio m³ als oberes Becken (Bild 1);
- der eine mittlere Oberfläche von 581 km² aufweisende Genfersee (Léman) als unteres Becken;
- ein 7,87 km langer Druckstollen \varnothing 4 m mit Wasserschloss und 1,39 km langem Druckschacht \varnothing 2,9 m zur Kavernenzentrale;
- eine grosse Kavernenzentrale (Bilder 3 und 4) auf Gebiet der Gemeinde Veytaux mit 200 m langem Unterwasserkanal und einer sonst ungewöhnlichen Anlage für die Ableitung von 175 m³/s zur raschen Absenkung des Speichersees Hongrin, die im Betrieb einen langgestreckten, mächtigen Wasserstrahl über die Wasseroberfläche des Genfersees auswirkt (Bilder 5 und 6).

¹ WEW 1966, S. 224/233

² Berichterstattung WEW 1966, S. 289/291