

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 88 (1970)
Heft: 11

Artikel: Die elektromechanische Ausrüstung der Kavernenzentrale Robiei
Autor: Graeser, Jean-Emile
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-84449>

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: 30.01.2026

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

Die elektromechanische Ausrüstung der Kavernenzentrale Robiei

DK 621.294

Von Jean-Emile Graeser, Ing. dipl. EPUL, Locarno 1)

Hierzu Tafeln 7 und 8

1. Einführung

Mit dem Bau des Wasserkraftwerkes Robiei mit einer installierten Leistung von 160 MW und der Inbetriebsetzung der fünf Maschinensätze dieser Zentrale haben die «Officine Idroelettriche della Maggia S.A.», Locarno, einen für die Schweiz bedeutenden Beitrag zur Entwicklung von Pumpspeicherwerken und deren elektro-mechanischer Ausrüstung geleistet. Die meisten Akkumulierpumpen haben in unserem Lande als Hauptaufgabe das Füllen von Jahresspeichern, deren natürliche Zuflüsse nicht genügen. Im Kraftwerk Robiei bildet diese Benützungsart nur einen Teil des Pumpenbetriebes. Die grosse installierte Leistung erlaubt es nämlich, dem Jahresrhythmus einen Pumpen-Turbinen-Rhythmus von sehr viel höherer Frequenz zu überlagern. So kann in den Zeiten schwacher Netzbelastung, also während den Nächten und über das Wochenende, mittels der Pumpen die im Netz verfügbare Überschussenergie zum Füllen des oberen Beckens von Cavagnoli mit Wasser aus dem Becken von Robiei verwendet werden, das 360 m tiefer liegt. Dieses jederzeit verfügbare Wasser wird in den Stunden hoher Netzbelastung in den Turbinen zur Erzeugung hochwertiger Spitzenenergie verwendet. So lässt sich das selbe Wasser mehrmals umwälzen und sichert dadurch eine wirtschaftliche Deckung des stark schwankenden Netzbedarfs.

Eine weitere bemerkenswerte Eigentümlichkeit des Kraftwerks Robiei stellt die neuartige Konstruktion der hydraulischen Maschinen dar. Von diesen arbeiten vier Pumpen-Turbinen mit Umkehrung des Drehsinnes, was für die Schweiz neu ist, und eine ist eine Turbinenpumpe des Typs «Isogyre», die eine erste Verwirklichung einer neuen Erfindung in industriellem Massstab darstellt.

Die Zentrale Robiei gehört jener Gruppe hydro-elektrischer Anlagen an, die die zweite Etappe der Maggia Kraftwerke bildet. Die Gesamtheit der Werke dieses sehr bedeutenden Unternehmens ist aus dem Lageplan Bild 1 und dem Längsprofil Bild 1a ersichtlich. Die jährliche Energieerzeugung beträgt bei mitt-

lerer Wasserführung 1230 GWh, wovon 703 GWh im Winter. Über diese Werke ist schon verschiedentlich berichtet worden [1] bis [4]²⁾. Nachfolgend sollen die elektro-mechanische Ausrüstung der unterirdischen Zentrale Robiei beschrieben und die Gründe dargetan werden, die in diesem besonderen Fall zur Wahl neuartiger Maschinen geführt haben. Anschliessend werden auch erste Erfahrungen bekannt gegeben, die bei den Inbetriebsetzungsversuchen und einer ersten Betriebsperiode gesammelt wurden sind. Die Darstellung beschränkt sich auf das Wesentliche der Einrichtungen und derer Betriebsweise. Interessante Einzelheiten sind in Veröffentlichungen der Lieferfirmen [5] bis [12] zu finden.

2. Gesichtspunkte für den Entwurf der Zentralenausrüstung

2.1. Aufgabe und Betriebsbedingungen

Um die für die Wahl der elektromechanischen Ausrüstung massgebenden Gesichtspunkte zu verstehen, ist vom Stand der Projektierung im Zeitpunkt auszugehen, als der Bauherr die Gesamtanlage in ihren Hauptlinien festgelegt hatte. Die wesentlichsten davon seien wie folgt festgehalten:

Die Zentrale Robiei und ihre Zuflussanlagen haben als Verbindungsorgane zu wirken einerseits zwischen den Speicherseen Cavagnoli und Naret und andererseits zwischen den Becken Robiei und Zöt, Bild 2. Die günstigen örtlichen Verhältnisse erlaubten es, die Maschinenkaverne beträchtlich unterhalb des Unterwasserspiegels anzuordnen, ohne auf einen Entlastungs- und Drainagestollen verzichten zu müssen, durch den allfälliges Leckwasser oder Durchsickerungen aus dem Gestein frei abfließen können. Dadurch ist einer wichtigen Forderung der Sicherheit Genüge getan. Diese Anordnung konnte man erreichen, ohne die Länge der Verbindungsstollen von 1600 m verändern zu müssen. Bei einem Bruttogefälle von 360 m ergibt sich ein Verhältniswert $L/H = 4,45$. Dank dieser Lage der Kaverne stehen die hydraulischen Maschinen unter einem Gegendruck, der, gemessen von der

Höhe der Laufräder aus, stets grösser als 35 m ist. Der Unterwasserstollen, der nach dem Speicherbecken Robiei führt, ist 600 m lang. Es erwies sich als notwendig, in unmittelbarer Nähe der Maschinen ein Unterwasserschloss einzubauen.

Je nach dem Wasserstand in den Becken kann das Bruttogefälle zwischen 285 und 395 m schwanken. Nun hat aber eine Voruntersuchung der Betriebsweise gezeigt, dass für den Hauptteil der erzeugten oder konsumierten Energie ein Bruttogefälle von 330 bis 375 m verfügbar ist. Bei diesem Gefällsbereich darf angenommen werden, dass der Gesamtwirkungsgrad der Umsetzung von Überschussenergie in Spitzenenergie über 70% liege, und zwar unabhängig vom zur Wahl stehenden Maschinentyp.

Beim damaligen Projektierungsstand, als man bereits einen Wochen- und einen Jahresrhythmus festgelegt hatte, führten ökonomische und energiepolitische Überlegungen zur Festlegung einer installierten Leistung von 160 MW. Diese ist bedeutend grösser als jene, die bei nur saisonmässigem Betrieb nötig gewesen wäre (42 MW für die Turbinen und 30 MW für die Pumpen), wie ursprünglich geplant war. Dementsprechend wurden die Zuleitungsstollen für einen Wasserstrom von $50 \text{ m}^3/\text{s}$ bemessen. Zur Weiterleitung bzw. zum Bezug der elektrischen Energie konnte die Zentrale mühelos an die 220 kV-Leitung Peccia-Innertkirchen angeschlossen werden, die in der Nähe durchführt.

Die Maschinen verarbeiten unter den günstigsten Betriebsbedingungen im Turbinenbetrieb jährlich 60 Mio m^3 im Jahresrhythmus und rund 250 Mio m^3 im Wochenrhythmus, wozu sie jährlich 1800 bis 1900 h in Betrieb stehen. Die entsprechenden Zahlen für den Pumpenbetrieb sind 29 bzw. rund 250 Mio m^3 bei 2200 bis 2300 h.

Bild 3 zeigt die Betriebsweise der Maschinen während den sieben Tagen einer Sommerwoche. Wie ersichtlich, wird die Energie paketweise geliefert oder bezogen. Um ein zackiges Betriebsdiagramm zu vermeiden, ist keine Leistungsabstufung der einzelnen Gruppe vorgesehen.

Wegen der schlechten Zugänglichkeit des Talkessels von Robiei hat man

¹⁾ Die Übersetzung ins Deutsche besorgte A. Ostertag, Zürich.

²⁾ Siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

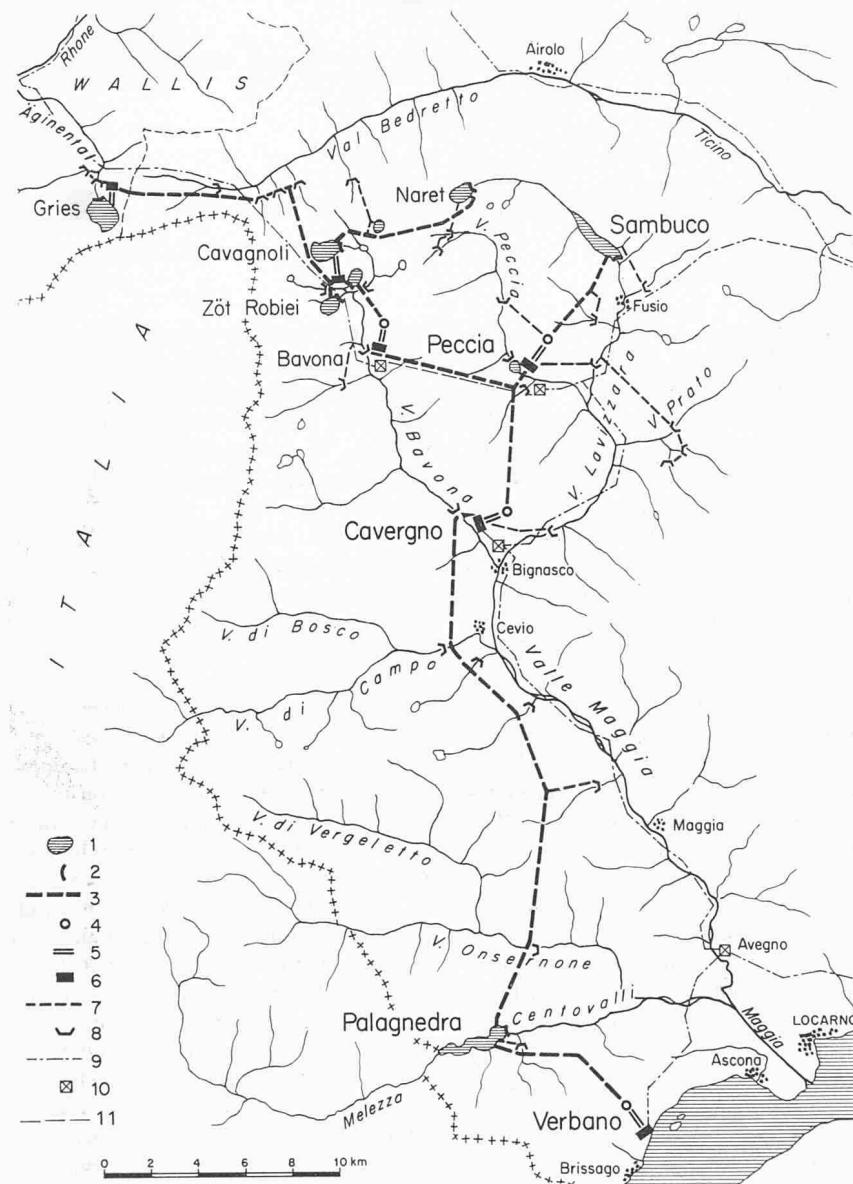


Bild 1a. Übersichtsplan der Maggia-Kraftwerke 1:300 000

- 1 Staubecken
- 2 Staumauer
- 3 Hauptstollen
- 4 Wasserschloss
- 5 Druckschacht
- 6 Zentrale
- 7 Nebenstollen
- 8 Wasserfassung
- 9 220-kV-Leitung
- 10 Schaltstation
- 11 Kabelstollen Bavona-Peccia

schliesslich das Ausführungsprojekt der Zentrale hervorging. Untersucht wurden folgende Varianten:

a) *Dreiteilige, horizontalachsige Gruppe*, bestehend aus einer Synchronmaschine, die sowohl als Motor wie auch als Generator bei unverändertem Drehsinn arbeitet und an deren beiden Wellenenden auf der einen Seite eine Francisturbine und auf der andern Seite eine Zentrifugalpumpe angekuppelt sind. Es handelt sich um einen seit langem bekannten und bewährten Maschinensatz, bei dem Pumpe und Turbine unter festgelegten Bedingungen mit besten Wirkungsgraden arbeiten. Die mit Geschwindigkeitsregler und Druckregler ausgerüstete Francisturbine behält alle für sie typischen Charakteristiken bei. Sie ermöglicht bei allen vorkommenden Betriebsbedingungen die Synchronisation der Gruppe und den Anlauf der Pumpe.

Die einzige Abweichung von der üblichen Ausführung derartiger dreiteiliger Gruppen hätte darin bestanden, dass für Robiei eine ausrückbare Kupplung für die Pumpe wegfallen wäre. Damit hätten sich beträchtliche Einsparungen an Material (je Gruppe zwei Lager) und an Baukosten (Vernässung der Länge der Maschinensätze und damit auch der Maschinenkaverne) erzielen lassen, die mindestens gleich, wenn nicht höher sind als der Betrag, der sich durch Kapitalisieren der zusätzlichen Leistungsverluste bei Turbinenbetrieb infolge der mit Wasser gefüllten, leer mitlaufenden Pumpe ergeben hätte. Da am Generator kein freies Wellenende verfügbar gewesen wäre, wurde für die Erregung eine statische Apparatur vorgesehen.

Bild 5 zeigt einen Querschnitt durch die Zentrale mit Maschinensätzen nach der Variante A. Von Nachteil sind hier die grosse Länge der Kaverne und die zahlreichen Abzweigungen mit Schiebern (insgesamt 16) an den beiden Verteilungsleitungen, die längs einer Seite der Kaverne verlaufen.

b) *Vertikalachsige Gruppe mit Wechsel des Drehsinnes*, bestehend aus einer umkehrbaren Pumpenturbine und einem synchronen Motor-Generator mit asynchronem Anlauf.

für den Antransport des Materials eine Seilbahn mit einer grössten Nutzlast von 20 t errichtet, Bild 4, die von San Carlo zur Baustelle führt. Die begrenzte Tragfähigkeit war bei der Konstruktion der Maschinen zu berücksichtigen.

2.2. Wahl des Maschinentyps

Bei den soeben geschilderten Gegebenheiten erschien trotz der Zurückhaltung gewisser Lieferfirmen, die wenig geneigt waren, von ihren gebräuchlichen Konstruktionen abzuweichen, eine Ausrüstung mit vier Gruppen von je 45 MVA elektrischer Leistung bei 1000 U/min die vorteilhafteste Lösung zu sein, und zwar aus folgenden Gründen:

– Dank dem grossen Gegendruck, der auf der Höhe der Laufräder herrscht, kann die spezifische Drehzahl $n_s = \text{rd. } 150$, die den höchsten Wirkungsgrad ergibt, ohne Kavitationsgefahr zugelassen werden.

– Die nicht regelbare Antriebsleistung beim Pumpenbetrieb, die je Gruppe in Abhängigkeit von der Förderhöhe zwis-

schen 30 und 40 MW schwankt, erlaubt eine für das Netz durchaus zulässige Abstufung der Leistungsaufnahme.

– Die verhältnismässig kleinen Abmessungen der einzelnen Gruppen, die sich dank der hohen Drehzahl ergeben, ermöglichen eine gedrängte Konstruktion der Zentrale mit geringem Ausbruchsvolumen.

– Die schwersten und sperrigsten Maschinenteile (Statorhälfte ohne Wicklung, Rotor ohne Pole, Spiralgehäuse) bleiben knapp unterhalb der für den Transport hinsichtlich Gewicht und Raumbedarf vorgeschriebenen Grenzwerte. Eine grössere Einheitsleistung oder eine niedrigere Drehzahl bei gleicher Leistung hätten eine stärkere Unterteilung der grossen Maschinenteile nötig gemacht.

Aufgrund der von den Lieferfirmen eingereichten Offerten für die hydraulischen und die elektrischen Maschinen wurden drei mögliche Lösungen in Betracht gezogen. Diese bildeten den Gegenstand einer Vergleichsstudie, aus der

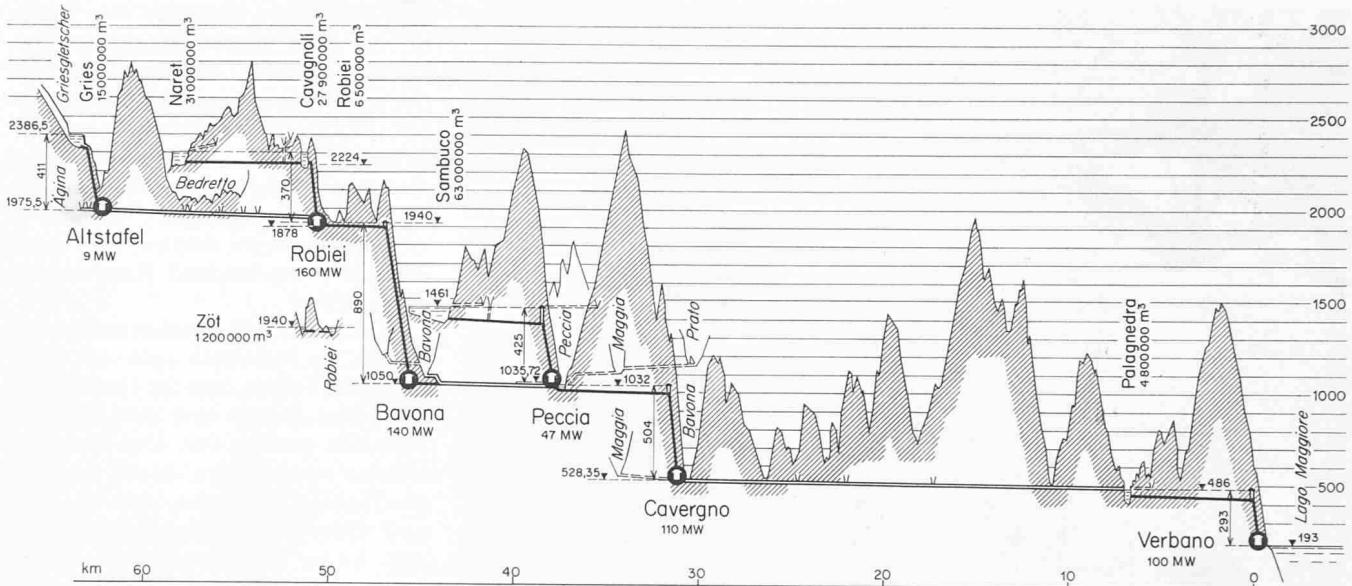


Bild 1b. Längenprofil der Maggia-Kraftwerke, Längen 1:300 000, Höhen 1:3000

Die selbe hydraulische Maschine, die mit einem als Diffusor bzw. als Leitrad wirkenden Kranz von beweglichen Leitschaufeln ausgerüstet ist, kann durch blosse Umkehrung des Drehsinnes vom Pumpen- auf den Turbinenbetrieb und umgekehrt umgeschaltet werden. Der dadurch erzielten beträchtlichen Vereinfachung auf der hydraulischen Seite entspricht allerdings eine gewisse Komplikation auf der elektrischen. Zusätzlich erforderlich sind nämlich ein Transfator, der beim Anfahren der Pumpe die Spannung automatisch verringert und so den Stromstoss in zulässigen Grenzen hält, und ein Phasenvertauscher. Außerdem bleibt der Wirkungsgrad bei beiden Betriebsarten unter dem normaler Maschinen (Variante A). Der Vorteil dieser Lösung besteht in der Einfachheit und im geringen Raumbedarf, was sich auf die Gesamtkosten günstig auswirkt. Auf den Bildern 7a und 7b ist die raumsparende Gruppierung der vier umkehrbaren Gruppen zu erkennen.

Tabelle 1. Prozentuale Kosten der drei untersuchten Varianten (Vergleichsbasis: Variante A = 100 %)

Variante	A	B	C
Hydraulische Maschinen mit Schiebern und Zubehör	61	32	49
Motor-Generatoren mit Erreger, Spannungsregler und allfälligen Einrichtungen zum Anfahren und zur Umkehrung der Phasen ¹⁾	39	43,5	39
Gesamtkosten einschl. Montage Kapitalisation der zusätzl. Verluste	100	75,5	88
Minderkosten der Kaverne mit Verteilleitungen	—	20,5	6,5
Vergleichbare Gesamtkosten	100	87	90

¹⁾ Ohne Haupttransformatoren 220/12 kV, die für alle drei Varianten gleich sind.

c) *Vertikalachsige Gruppe «Isogyre»*, bestehend aus einer neuartigen, patentierte Maschine, die ohne Drehsinnwechsel als Pumpe oder als Turbine arbeiten kann, und aus einem synchronen Motor-Generator. Von dieser Maschine ist bis jetzt nur ein Prototyp ausgeführt worden.

Die Charakteristiken dieser Gruppe erscheinen mit denen der Variante A vergleichbar. Das Besondere besteht darin, dass die Laufräder der Pumpe und der Turbine nebeneinander in einem gemeinsamen Spiralgehäuse eingebaut sind. Achsial verschiebbare, konzentrisch um die Laufräder herumgelegte Hülsen ermöglichen das Absperren und Entleeren des nicht im Betrieb stehenden Laufrades. Diese Bauart ergibt eine beträchtliche Materialersparnis und eine Verringerung des Raumbedarfes, was sich vorteilhaft auf die Anlagekosten auswirkt. Hinzu kommt die Einfachheit der elektrischen Einrichtungen. Diese Vorteile gaben Anlass, die Variante C in

engere Wahl zu nehmen. Immerhin erfordert die Turbinenpumpe «Isogyre» in ihrem gegenwärtigen Entwicklungsstand infolge ihrer nicht einfachen Bauweise grosse Vorsicht bei der Montage, und es besteht bei ihr auch eine gewisse Unklarheit bezüglich der Betriebssicherheit. Bild 6 zeigt einen Schnitt durch die Zentrale, in welchem eine vertikalachsige Gruppe nach der Variante C für 45 MVA eingezeichnet ist.

Auf Tabelle 1 sind die verhältnismässigen Kosten der drei Varianten einander gegenübergestellt, wie sie sich aufgrund der eingezogenen Offerten ergeben haben. Beim Vergleich der Zahlen ist zu berücksichtigen, dass diese sich auf Ausführungen beziehen, die sich in voller technischer Entwicklung befinden. Aufgrund der vergleichenden Studien der drei Varianten entschied sich der Bauherr für den Einbau von vier umkehrbaren Gruppen der Variante B und etwas später für den einer horizontalachsigen Gruppe «Isogyre» von verringriger Leistung.

3. Beschreibung der ausgeführten Anlagen

3.1. Hauptdaten

Im heutigen Ausbau besteht die elektromechanische Ausrüstung der unterirdischen Zentrale Robiei im wesentlichen aus folgenden Maschinensätzen:

Vier umkehrbare Hauptgruppen nach Bild 8, bestehend aus:

– vier Umkehr-Pumpen-Turbinen von Gebrüder Sulzer AG, Winterthur, gebaut für folgende Daten:

	Turbine	Pumpe
<i>H</i>	m	276/390
<i>Q</i>	m ³ /s	9,85/11,72
<i>N</i>	MW	23,0/40,8
<i>n</i>	U/min	+1000
		—1000

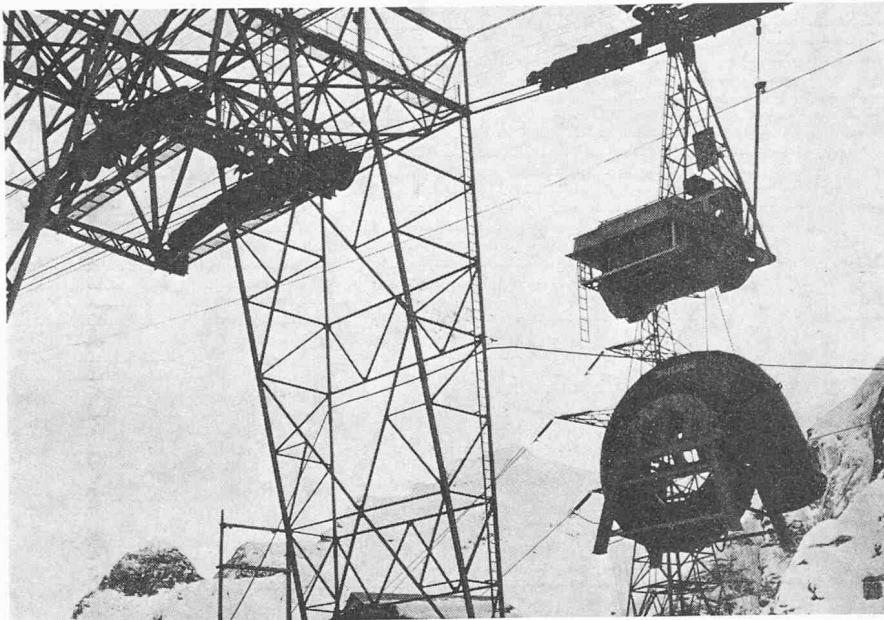


Bild 4. Seilbahntransport eines Spiralgehäuses; das Transportgewicht erreicht die Tragfähigkeit von 20 t

- vier Kugelschieber für die Druckleitungen und vier Kugelschieber mit konischem Durchgang für die Ablauf- bzw. Saugleitungen von den Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey S.A., Vevey, die Hochdruckschieber gebaut für einen Nenndurchmesser von 1200 mm und einen Prüfdruck von 800 m WS, die Niederdruckschieber für 1144/1375 mm und 650/160 m WS.
- vier synchrone Motor-Generatoren, deren Rotoren für asynchronen Anlauf vorgesehen sind, von der Société Anonyme des Ateliers de Sécheron, Genève, und gebaut für eine Leistung von 45 MVA bei 50 Hz, $\cos \varphi = 0,8$ (Generator) bzw. 0,95 (Motor), Spannung 12 kV, Drehzahl ± 1000 U/min, $GD^2 = 43$ tm^2 , Durchbrenndrehzahl 1650 U/min.
- zwei automatische Anlass-Transformatoren zur Spannungsverminderung mit eingebautem Stufenschalter von Sécheron.

Eine «Isogyre»-Gruppe nach Bild 9, bestehend aus:

- einer Turbinen-Pumpe «Isogyre» mit horizontaler Achse von den Ateliers des Charmilles S.A., Genève, gebaut für folgende Daten:

	Turbine	Pumpe
H m	276/390	285/395
Q m^3/s	2,25/2,94	2,30/1,12
N MW	5,46/10,0	8,22/5,30
n U/min	+1500	+1500

- einem synchronen Motor-Generator von Sécheron, gebaut für eine Leistung von 10 MW bei 50 Hz, $\cos \varphi = 0,8$ (Generator) bzw. 0,95 (Motor), Spannung 12 kV, Drehzahl 1500 U/min, $GD^2 = 3,5$ tm^2 , Durchbrenndrehzahl 2550 U/min.

Betonfundament verankert. Die Spirale ist von einer breiten elastischen Umkleidung umgeben, die ihr erlaubt, sich frei auszudehnen, und die zugleich vom Maschinenbetrieb herrührende Erschütterungen dämpft. Die Gehäusedeckel sind sehr kräftig gebaut, damit sie den vollen Zuleitungsdruck aufnehmen können, was wegen dem auf der Niederdruckseite angebrachten Kugelschieber notwendig ist.

Zahlreiche Teile bestehen aus Spezialstählen, im besondern auch aus nichtrostenden Stählen, was im Hinblick auf das grosse Gefälle und den leichteren Unterhalt geboten war. Um Revisionsarbeiten zu erleichtern, wurde die Pumpen-Turbine so gebaut, dass sie unter dem Generator auseinandergenommen und wieder zusammengebaut werden kann, ohne diesen zu berühren. Das Spurlager, das ebenfalls vom Turbinenkonstrukteur geliefert wurde, befindet sich über dem Generator. Damit es in beiden Drehrichtungen arbeiten kann, waren besondere Massnahmen nötig. Eine getrennte Pumpengruppe versorgt die Lager mit Drucköl.

3.3. Kugelschieber für die umkehrbaren Gruppen

Da die Leitradkränze der Pumpen-Turbinen sich nur langsam bewegen, fällt den Kugelschiebern auf der Hochdruckseite die Aufgabe zu, im Notfall als Schnellschlussorgane zu wirken. Dementsprechend sind sie so konstruiert worden, dass sie bei vollem Durchfluss in sehr kurzer Zeit schliessen können. Mit dieser Anordnung wird beim Abschalten des Pumpenbetriebs eine zu starke Veränderung der Strömung in der Druckleitung vermieden und der dort auftretende Druckstoss gemildert. Die Antriebsorgane sind so stark bemessen, dass die Schieber auch bei nicht ausgeglichenen Drücken betätigt werden können [12].

Da auf der Niederdruckseite der Maschinen stets ein Gegendruck herrscht – er kann zwischen 35 und 65 m WS schwanken –, musste nach jeder Gruppe ein Schieber eingebaut werden, um jede Gruppe einzeln demontieren zu können, ohne den Betrieb der andern zu stören. Hiefür sind Kugelschieber mit konischem Durchgang nach Bild 8 verwendet worden. Im Gegensatz zu Klappen weisen sie im geöffneten Zustand keinerlei strömungsbehindernde Teile auf, was besonders beim Turbinenbetrieb wichtig ist. Ausserdem ist ihr Raumbedarf gering, was ihren Einbau in die Niederdruck-Rohrstützen erleichtert und auch die Ausbrucharbeiten für die Kaverne abkürzt.

Zwischen Pumpen-Turbine und niederdruckseitigem Kugelschieber wurde ein konisches Rohrstück eingebaut, das

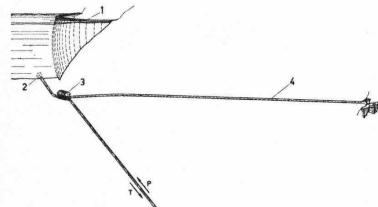


Bild 2. Perspektivische Darstellung des Stollensystems

- 1 Staumauer
2 Einfahrtbauwerk
3 Schieberkammer
4 Stollenfenster
- 5 gepanzelter Druckschacht
6 Unterwasserschloss
7 Niederdruckstollen
8 Zugangsstollen

- 9 Entlastungs- und Drainagestollen
10 Zuleitungsstollen zum Kraftwerk Bavona
11 Verbindungsstollen mit dem Ausgleichsbecken Zöt
12 Zuleitungsstollen vom Kraftwerk Altstaffel
- 13 Deponie
14 Wasserfassung

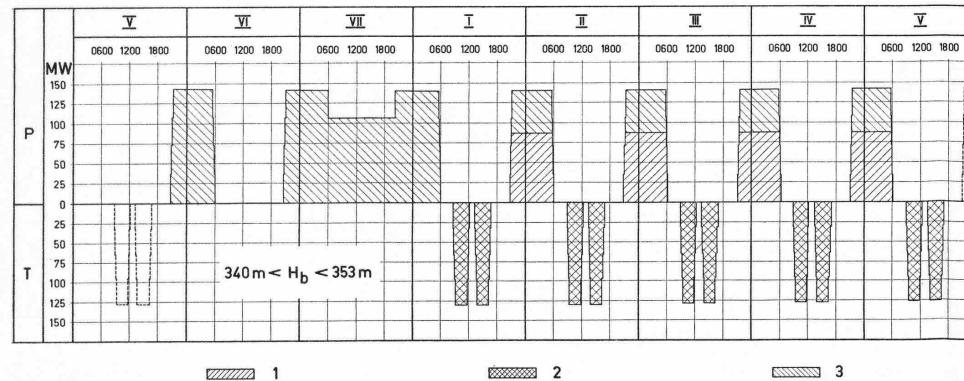


Bild 3. Typisches Betriebsdiagramm für eine Sommerwoche

I bis VII Montag bis Sonntag 1 Wöchentlicher Pumpenbetrieb 2 Wöchentlicher Turbinenbetrieb 3 Saisonmässiger Pumpenbetrieb

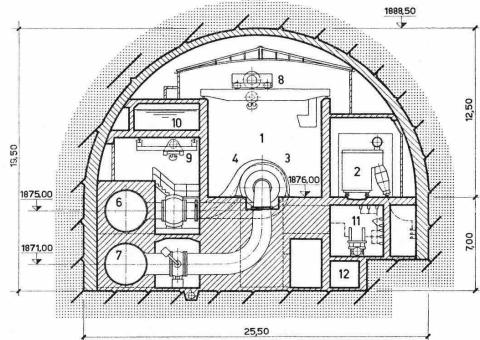


Bild 5. Zentralenquerschnitt 1:400 mit dreiteiligen Maschinengruppen nach Variante A, 45 MVA

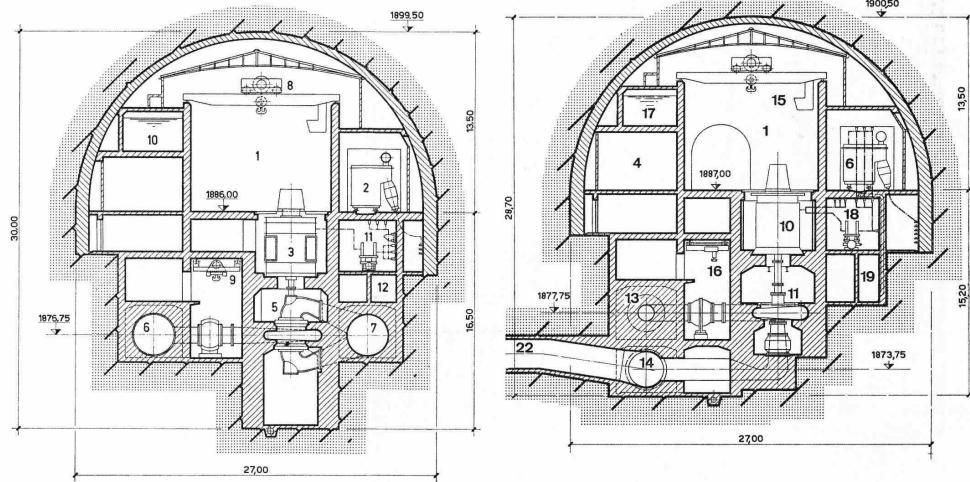


Bild 6. Zentralenquerschnitt 1:400 mit Maschinengruppen «Isogyre» nach Variante C, vertikalachsig Anordnung, 45 MVA

- 1 Maschinensaal
2 Haupttransformatoren 12/220 kV
3 Motor-Generator 45 MVA
4 Pumpen und Turbine
5 Turbinen-Pumpe «Isogyre»
6 Hochdruck-Verteileitung
- 7 Niederdruck-Verteileitung
8 Laufkran 2 × 40 t
9 Laufkran 20 t
10 Kühlwasserbehälter
11 12-kV-Anlage
12 Ölauffanggrube

Bild 7a. Zentralenquerschnitt 1:400 mit Pumpen-Turbinen nach Variante B entsprechend der ausgeführten Anlage, 45 MVA

Legende s. Bild 7b

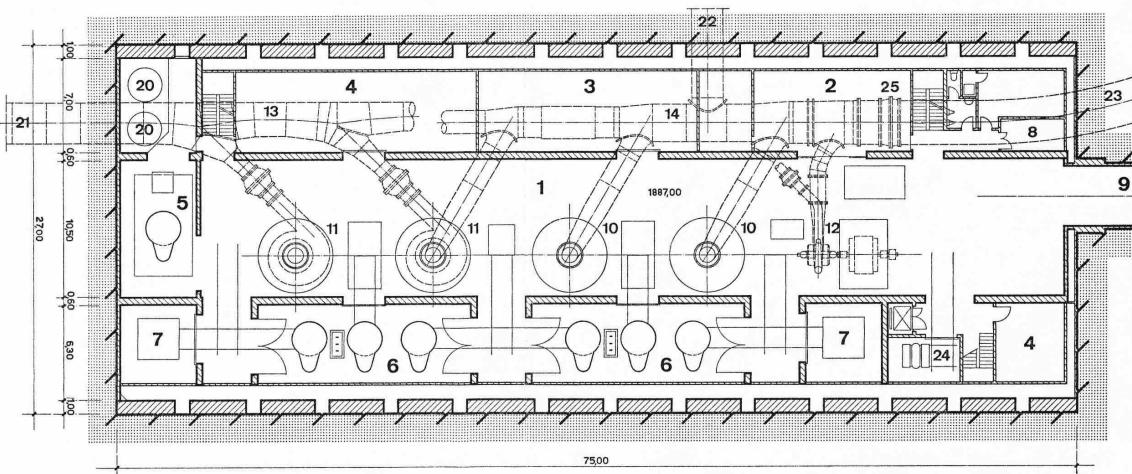


Bild 7b. Grundriss der Zentrale Robiei 1:400

- 1 Maschinensaal
2 Kommandoraum
3 Werkstatt
4 Magazin
5 Raum für Revision der Transformatoren
6 Haupttransformatoren 12/220 kV
7 Anlass-Transformatoren
8 Sanitätsraum
9 Zugangsstollen
10 Motor-Generator 45 MVA
11 Umkehr-Pumpe-Turbine
12 Turbinen-Pumpe «Isogyre»
13 Hochdruck-Verteileitung
14 Niederdruck-Verteileitung
15 Laufkran 2 × 40 t
16 Laufkran 20 t
17 Kühlwasserbehälter
18 12-kV-Anlage
19 Ölauffanggrube
20 Ölbehälter
21 Gepanzelter Druckschacht
22 Verbindung zum Unterwasserschloss
23 Niederdruckstollen
24 Hilfstransformator 12/16 kV
25 Absperrklappe 3100 mm

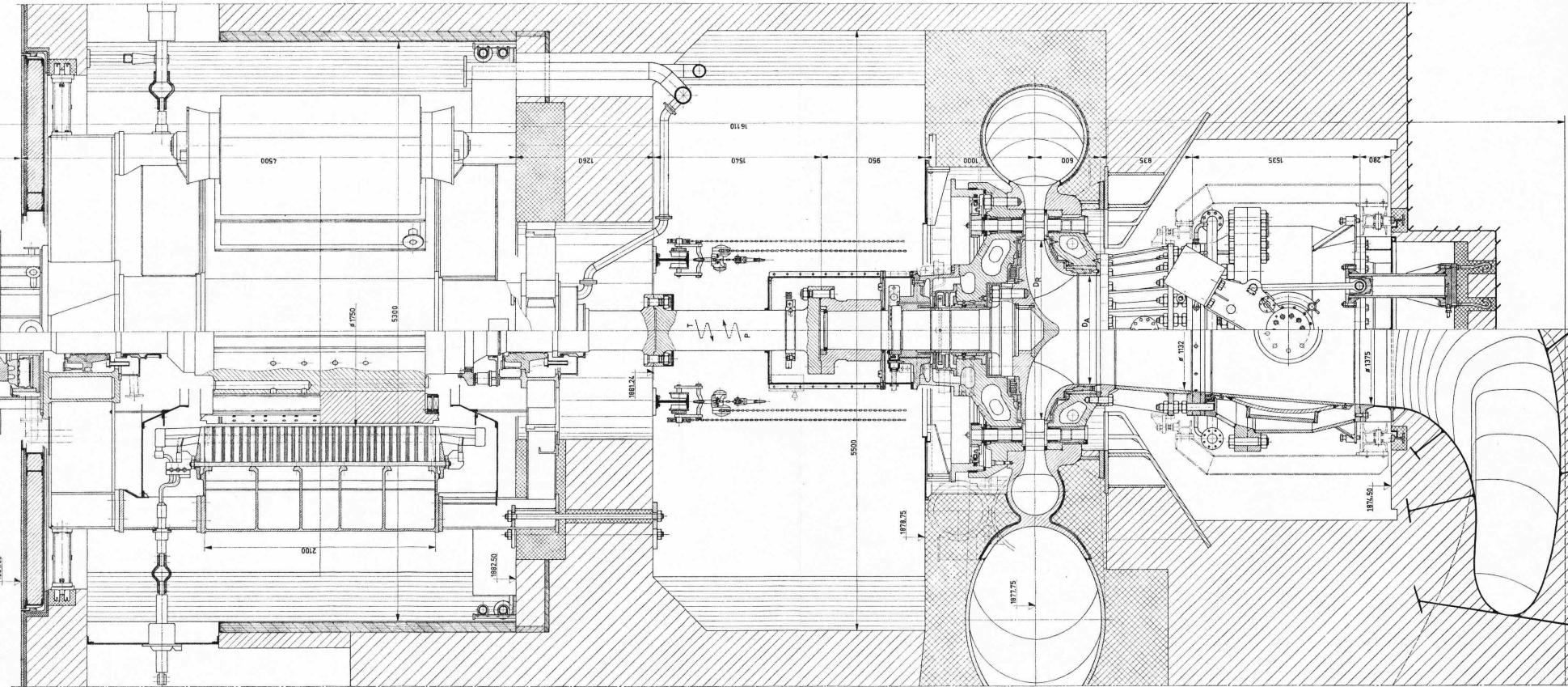


Bild 8a. Kugelschieber auf der Hochdruckseite, 1:40

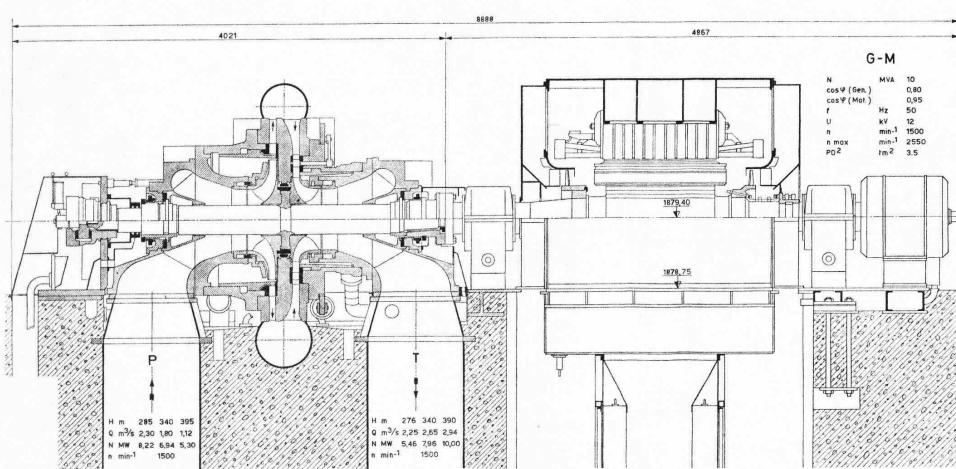


Bild 9. Längsschnitt 1:50 durch die Turbinen-Pumpe «Isogyre» von 10 MVA bei 1500 U/min

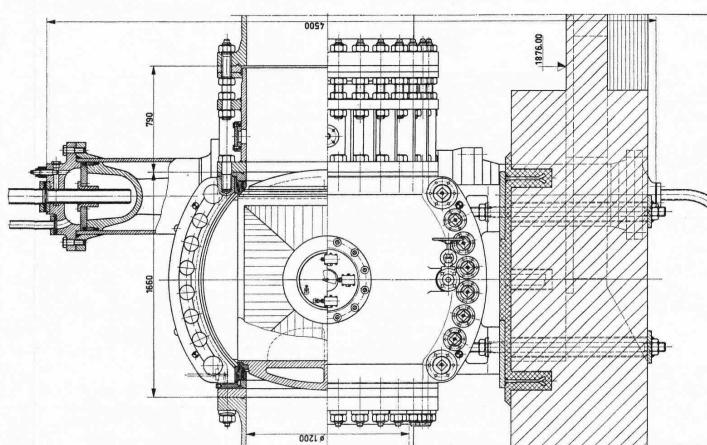


Bild 8 (rechts). Längsschnitt 1:40 durch eine der vier umkehrbaren Pumpen-Turbinegruppen von je 45 MVA bei 1000 U/min

Legende zu Bild 10

- | | |
|---|--|
| a Drucköl (Druck konstant) | 8a Vorsteuer-Vorrichtung für die Leitapparat-Stellung |
| b Steueröl (Druck variabel) | 8b Stellungsanzeiger von 5 (Rückführung) |
| c Ablauföl | 8c Stellungsanzeiger von 9 |
| d Wasser aus Niederdruck-Verteilleitung | Die Apparate 8 wandeln die Stellungen der zugehörigen Anzeiger in elektrische Signale um |
| e Wasser aus Hochdruck-Verteilleitung | 9 Messgerät für das Nettogefälle |
| f Elektrische Verbindungen | 10 Nockenscheibe zu 9 |
| 1 Akkumulator für Drucköl | 11 Elektronisches Steuengerät |
| 2 Ölpumpengruppe | 12 Kommandogerät für automatische (CA) und manuelle (CM) Betätigung |
| 3 Steuerventile (sind entweder ganz offen oder ganz zu) | 13 Synchronisierungs-Apparat |
| 4 Schnellschluss-Steuerventil | 14 Antriebsmotor zu 8a |
| 5 Leitapparat | |
| 6 Servomotor zu 5 | |
| 7 Sicherheitsregler | |

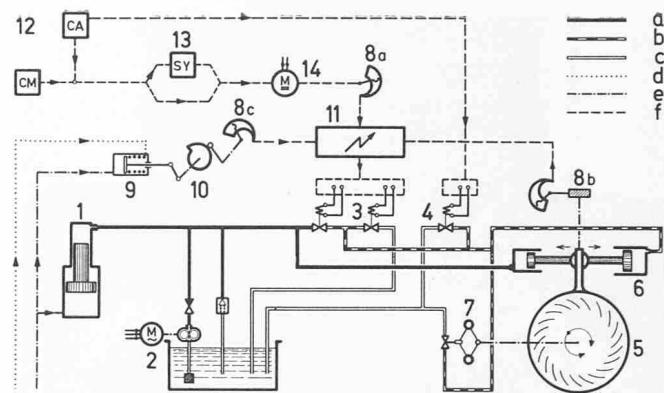


Bild 10. Prinzipschema des Leitradantriebes für die Umkehr-Pumpen-Turbinen nach Bild 8

sich leicht demontieren lässt und so einen direkten Zugang zum Laufrad ermöglicht. Die hierfür nötige Aussparung im Maschinenfundament macht dessen Verstärkung durch zwei, in Bild 8 eingezeichnete Konsolen in Schweisskonstruktion erforderlich, welche die vom Spiralgehäuse-Innenring herkommenden Kräfte an die angrenzenden Mauern übertragen.

Die Kugelschieber sowohl auf der Hochdruck- wie auf der Niederdruckseite weisen keine automatisch betätigten By-pass-Organe auf. Bei der ersten Inbetriebsetzung werden die Maschinen mittels einer Hilfsleitung gefüllt. Im normalen Betrieb bleiben sie immer voll Wasser. Der Ausgleich der vor und nach den Kugelschiebern herrschenden Drücke vollzieht sich durch Öffnen des Dichtungsringes im Schieber, allenfalls spätestens nach der ersten Öffnungsbewegung des Drehkörpers.

3.4. Der Motor-Generator

Der mit der umkehrbaren Pumpen-Turbine gekuppelte Motor-Generator arbeitet nicht nur sowohl als Motor wie auch als Generator mit synchroner Drehzahl, sondern ist auch fähig, ohne eine Hilfseinrichtung mit der Pumpe anzufahren, deren Antriebsdrehmoment bei voller Drehzahl einen nicht zu unterschätzenden Teil des normalen Drehmomentes ausmacht. Diese Wirkungsweise erforderte besondere konstruktive Massnahmen, die dem Motor einen korrekten Gang im asynchronen Betriebsbereich ermöglichen. Dazu wurden an den Enden der massiven Polschuhe interpolare Verbindungen angebracht, welche auf Bild 12 zu sehen sind und welche die sehr starken Ströme ableiten, die nur während dieses kurzen Betriebsbereiches durch den magnetischen Kern des Rotors fliessen. Bei der Ausführung dieser Verbindungen konnte die Herstellerfirma aus eigenen Erfahrungen Nutzen ziehen [8], [9]. Das Wärmepeichervermögen der Maschine ist so

gross, dass nacheinander zwei Anlaufvorgänge mit der Pumpe möglich sind, ohne die üblichen Grenzen für die Erwärmung zu erreichen.

Zum Aufrechterhalten einer genügenden Kühlungströmung dienen je Maschine acht besondere Ventilatoren, die paarweise auf den mit Kühlwasser betriebenen Luftkühlern angeordnet sind. Dies war nötig, weil die üblicherweise am Rotor angebauten Ventilatoren wegen des Drehsinnwechsels nicht angewendet werden konnten.

Da die Gruppe bei jedem Abschalten der Turbine die Durchbrenndrehzahl erreicht, bevor sie stillsteht, mussten die Rotoren für eine höchste Drehzahl von 1650 U/min gebaut werden. Bei der grössten Fallhöhe beträgt die Durchbrenndrehzahl 1390 U/min, wobei Beharrungszustand vorausgesetzt ist. Sie kann infolge Druckstossbildung im ungünstigsten Fall bis auf 1560 U/min ansteigen.

Um das vom Bauherrn mit Rücksicht auf den Transport vorgeschriebene Maximalgewicht einhalten zu können, musste die Statorwicklung am Aufstellungsort ausgeführt werden. Für diese langwierige Arbeit wurde in der Zentrale ein Montagefeld bereitgestellt.

3.5. Anlasstransformatoren

Die Motor-Generatoren sind über zwei Einphasen-Transformatorgruppen 12/220 kV von je 90 MVA Leistung ans Netz angeschlossen. Jede Gruppe bedient zwei Maschinen. Die zugehörige Installation von 12 kV weist folgende Besonderheiten auf:

- Je ein Satz Trenner zum Phasenumtausch an den Klemmen jeder Maschine, der deren Drehsinnwechsel ermöglicht,
- je ein Anlasstransformator für je zwei Maschinen zusammen mit einem Satz Schienen mit Zubehör zur momentanen Einschaltung dieses Transformators in den Stromkreis des Motor-Generators.

Der Anlasstransformator ist ein automatisch wirkender Dreiphasen-Stufen-

transformator, der die Spannung an den Motorklemmen während des Anlassens verringert, um den Stromstoss und den entsprechenden Spannungsabfall im Netz zu begrenzen. Er ist mit einem Stufenschalter versehen, der einen schrittweisen Übergang von der verringerten Spannung beim Einschalten zur normalen Betriebsspannung bewirkt. Dieser Transformator weist keine Kühlung auf. Seine Wärmespeicherfähigkeit ist so gross, dass er nacheinander vier Anlassvorgänge zu bewältigen vermag. Allerdings muss er sich nach einer solchen Beanspruchung während mindestens zwei Stunden abkühlen können.

3.6. Steuerung der Hauptgruppen

Jede Gruppe ist mit einer elektrischen Steuerung ausgerüstet, die erlaubt, die verschiedenen Operationen eines Schaltvorganges entweder von Hand oder automatisch durchzuführen. Im zweiten Fall genügt es, einen Wähler (für Pumpen- oder Turbinenbetrieb) mit Impulskontakten für den Anlauf und einen Schalter (Stop) zu betätigen, worauf alle übrigen Operationen für das Anlaufen oder das Abstellen, sei es für einen Betrieb als Pumpe, sei es für einen solchen als Turbine, in der richtigen Reihenfolge selbsttätig ablaufen. Diese Operationen werden nachstehend beschrieben.

3.6.1. Der Anlauf als Turbine

Zuerst öffnet der Niederdruck-Kugelschieber. Sobald dieser voll offen ist, beginnt auch der Hochdruck-Kugelschieber zu öffnen, wobei er nach Durchlaufen einiger Zehntelgrade seines Öffnungswinkels über einen Kontaktgeber den Steuerschieber des Turbinenreglers in jene Leerlaufstellung bringt, die dem herrschenden Gefälle entspricht (Es bestehen zwei Stellungen, eine für hohes, die andere für niedriges Gefälle). Nun läuft die Gruppe an und erreicht rasch eine wenig unter ihrer normalen Geschwindigkeit liegende Drehzahl.

Jetzt übernimmt der Synchronisierungsapparat 13, Bild 10, die Drehzahl-

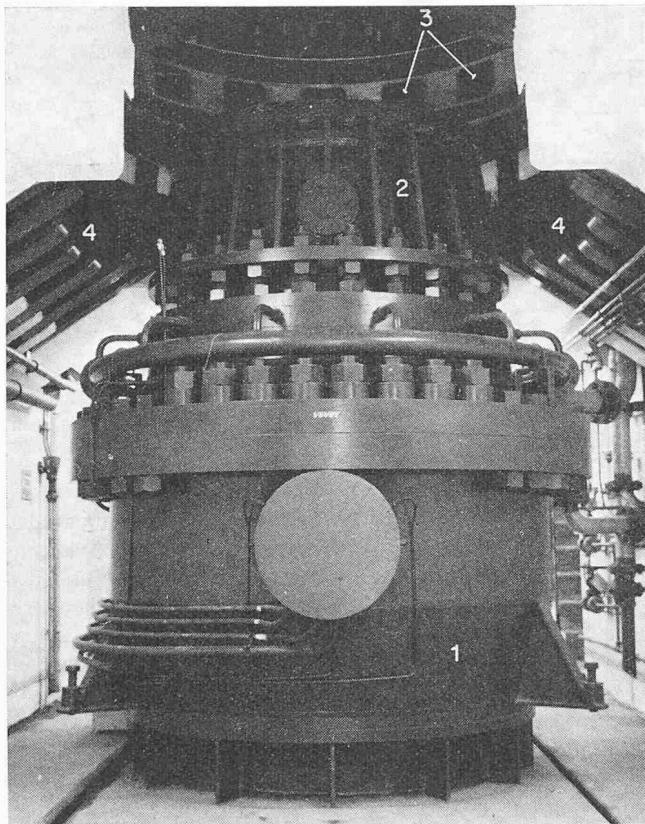


Bild 11. Kugelschieber mit konischem Durchgang unter der Pumpen-Turbine, gesehen von der dem Antrieb entgegengesetzten Seite

- 1 Schiebergehäuse
- 2 Konisches Rohrstück, das bei geschlossenen Schiebern entfernt werden kann und so den Zugang zum Laufrad ermöglicht
- 3 Öffnungen im Stützschaufelring (Laufrad und Seitendeckel mit Leitschaufeln sind nicht montiert)
- 4 Seitliche Konsolen, mit denen der Stützschaufelring verschraubt ist

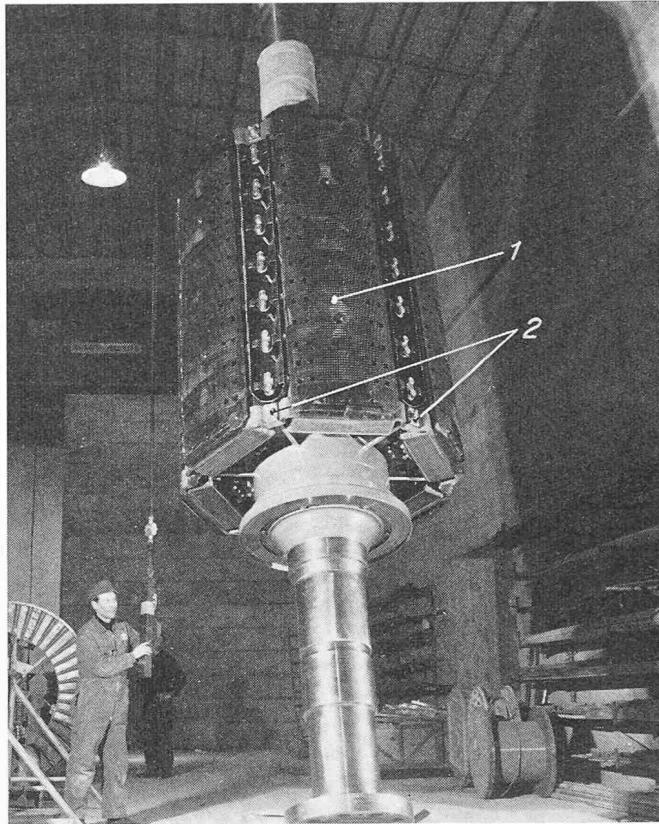


Bild 12. Rotor des Motor-Generators für 45 WVA, 1000 U/min

- 1 massiver Pol
- 2 Interpolare Verbindungen, bestehend aus Kupferlamellen, die mit den Enden der Polschuhe verlötet sind. Dank ihres Aufbaues aus Lamellen vermögen diese Verbindungen den Wärmedehnungen ohne zusätzliche Spannungen zu folgen

steuerung und korrigiert mittels Impulsen, die dem Motor 14 der Vorsteuer-Vorrichtung 8 erteilt werden, die Stellung des Leitschaufelkranzes, bis eine mit der Netzfrequenz synchrone Drehzahl und die Übereinstimmung der Phasen erreicht ist. Als letzter Vorgang wird der Generator aufs Netz geschaltet, worauf der Lastverteiler die Leitradöffnung entsprechend der gewünschten Leistung einstellt. Das Anlaufen kann auch ohne Synchronisierungsapparat vorgenommen werden. Dabei wird nach erfolgtem Anlauf mittels der Turbine der nicht erregte Generator über den automatischen Anlasstransformator aufs Netz geschaltet, sobald er seine normale Drehzahl beinahe erreicht hat; die Synchronisierung erfolgt dann in entsprechender Weise, wie sie im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

3.6.2. Der Anlauf als Pumpe

Beim Ausarbeiten des Projektes war aufgrund der Charakteristiken der die umkehrbaren Gruppen bildenden Maschinen leicht einzusehen, dass ein Anlauf mit wassergefüllten Pumpen zweckmäßig ist. Tatsächlich ist die als Motor wirkende elektrische Maschine trotz einem Anlaufstrom, der weniger als das

Doppelte des Vollaststromes beträgt, in der Lage, das widerstehende Drehmoment des wassergefüllten Pumpenrades zu überwinden und die Nenndrehzahl genügend rasch zu erreichen. Die dadurch mögliche Betriebsweise ist in zwei Hinsichten vorteilhaft. Erstens können die komplizierten Einrichtungen zum Entleeren und Füllen der Pumpen weggelassen werden. Zweitens ist eine besondere Anwurfturbine oder ein entsprechender Motor nicht erforderlich, da der Motor-Generator deren Funktion übernehmen kann.

Bild 13 zeigt den zeitlichen Verlauf von vier verschiedenen Anlaufvorgängen einer wassergefüllten Pumpe. Bei der Variante 1, bei welcher im Moment des Einschaltens der Leitapparat geöffnet und der Kugelschieber auf der Hochdruckseite geschlossen ist, werden die volle Drehzahl erst nach 60 Sekunden und der volle Förderstrom erst nach rund 110 Sekunden erreicht. Diese Betriebsart ist nur bei der Ausarbeitung des Projektes in Betracht gezogen, aber nie angewendet worden. Die Variante II wurde aufgrund von in anderen Anlagen gesammelten Erfahrungen und einer besseren Kenntnis des Betriebsverhaltens des Leitapparates ausgearbeitet. Sie ist

bei den Inbetriebsetzungsversuchen und den dabei durchgeführten Messungen angewendet worden. Bei ihr wie auch bei den Varianten III und IV sind Leitapparat und Hochdruck-Kugelschieber beim Einschalten geschlossen; sofort nach dem Einschalten öffnet der Schieber, während der Leitapparat erst nach rund 40 Sekunden zu öffnen beginnt. Alsdann setzt auch die Förderung ein; sie erreicht aber erst nach rund 115 Sekunden ihre volle Stärke. Die Variante III, bei welcher im Gegensatz zu Variante II der Leitapparat viel früher zu öffnen beginnt, bezieht sich auf das Anfahren, wie es in Zukunft durchgeführt werden soll. Die Förderung beginnt mit dem Öffnen des Leitapparates, der nach 90 Sekunden voll offen ist. Bei Variante IV erfolgt das Anfahren mit voller Netzzspannung. Schon nach 15 Sekunden beginnt sich der Leitapparat zu öffnen, und ist nach 85 Sekunden voll offen. Diese Art des Anfahrens ist nur versuchsweise durchgeführt worden. Für den normalen Betrieb kommt sie nicht in Betracht, da sie nach der Meinung der Lieferfirmen zu beschleunigter Ermüdung des Materials führen würde.

In den Varianten II, III und IV wird der Leitapparat automatisch in die günstige

stigste, dem jeweils vorhandenen Gefälle entsprechende Stellung gebracht, sobald die Gruppe die mit dem Netz synchrone Drehzahl erreicht hat. Die Steuereinrichtungen, die nach dem auf Bild 10 dargestellten, vereinfachten Prinzipschema geschaltet sind, umfassen die zur Verwirklichung dieser Schaltfolge erforderlichen Geräte. Sie erlauben keine Regelung der Leistung; vielmehr sind sie so eingestellt, dass jedem Gefälle nur ein einziger Betriebspunkt zugeordnet ist.

3.6.3. Wechsel der Betriebsweise

Diese Wechsel sind bis jetzt in der Weise durchgeführt worden, dass einem vollständigen Abstellvorgang ein vollständiger Anfahrvorgang nachfolgte. Die vorhandenen Steuereinrichtungen erlauben, diese Vorgänge, die verhältnismässig viel Zeit beanspruchen, dadurch abzukürzen, dass die Bewegungen der Niederdruckschieber unterlassen und die Hilfsgeräte in Betrieb gehalten werden. Es sei hier ausdrücklich betont, dass der Bauherr keinen Wert auf eine möglichst rasche Durchführung der für die Betriebswechsel erforderlichen Schaltvorgänge gelegt hat. Tatsächlich sind bei der vorgesehenen Betriebsweise der Zentrale je nach dem zum voraus aufgestellten Programm täglich nur zwei oder drei Betriebswechsel vorzunehmen. Sowohl beim Pumpen- als auch beim Turbinenbetrieb dauert das Anfahren bis zum Erreichen der vollen Fördermenge einschliesslich Inbetriebsetzung der Hilfsbetriebe sowie volles Öffnen des Niederdruck-Kugelschiebers $2\frac{1}{2}$ bis $3\frac{1}{2}$ Minuten. Beim Abstellen ist der Zeitbedarf etwas grösser. Es besteht kein Bedürfnis, ihn abzukürzen.

3.7. Die Turbinen-Pumpe «Isogyre», Bilder 9 und 14

Obwohl diese Gruppe wie die andern für normalen Betrieb vorgesehen ist, kommt ihr doch der Charakter einer Versuchsmaschine zu. Für sie gilt, was oben im Abschnitt 2.2 gesagt wurde. Sie unterscheidet sich von den Maschinen der vier Hauptgruppen hauptsächlich durch ihre kleinere Leistung und ihre horizontalachsige Bauweise. Diese ermöglicht, besondere Abschlussklappen auf der Niederdruckseite zu vermeiden. Um das ausser Betrieb stehende Laufrad zu entleeren und es während des Betriebes des andern Laufrades wasserfrei zu halten, genügt es, durch andauerndes Einführen von Druckluft das Wasserniveau bis unterhalb des betreffenden Rades zurückzudrängen. Im übrigen sei auf die erschienenen Veröffentlichungen [5], [6], [7] hingewiesen.

Ausser der Reglerausrüstung der Turbine mit elektronischem Geschwin-

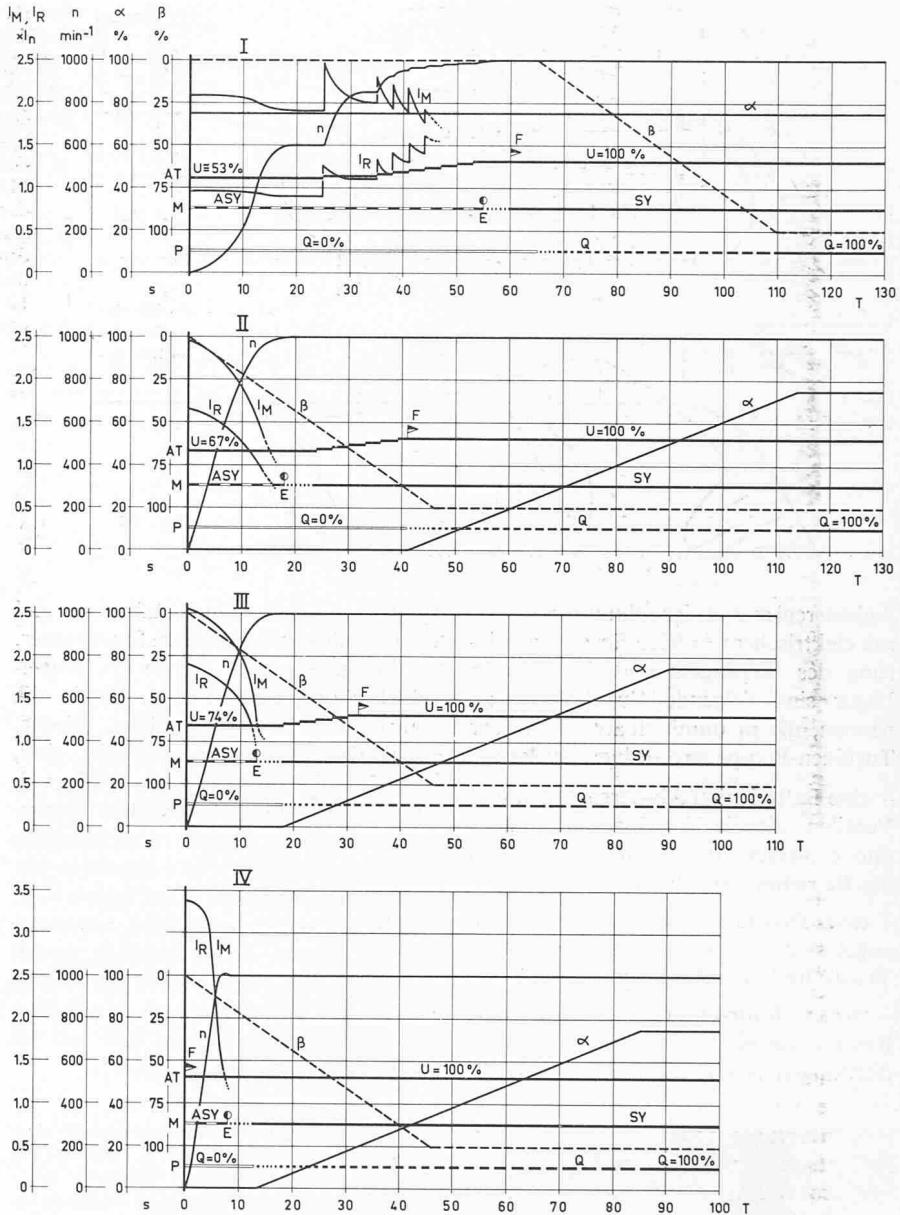


Bild 13. Anfahrdiagramme bei Pumpenbetrieb mit wassergefülltem Laufrad

- I. Ursprüngliches Projekt, ungefährer Verlauf der charakteristischen Grössen
- II. Gemessener Verlauf der charakteristischen Grössen beim Anfahren, wie es in der ersten Betriebsperiode durchgeführt wurde
- III. Für den zukünftigen Betrieb vorgesehener Anfahrvorgang (nach Berechnungen, die sich auf ausgeführte Messungen stützen)
- IV. Anfahrvorgang mit voller Spannung an den Motorklemmen, Messungen anlässlich von Sonderversuchen

I_M Strom, an den Motorklemmen gemessen

I_R Strom auf der Netzseite

I_n Strom bei Normallast; Motor 2160 A (12 kV); Netz 118 A (220 kV)

n Drehzahl in U/min

α Leitapparat-Öffnung in Prozenten

β Kugelschieber-Öffnung in Prozenten (Hochdruckseite)

T Zeit in s. $T=0$: Einschalten des Motors bei wassergefülltem Laufrad

Q Förderstrom in Prozenten

P Linie, die den zeitlichen Verlauf des Pumpenförderstromes angibt

M Linie, die den zeitlichen Verlauf der Betriebsart des Motors angibt

ASY Asynchroner Anlauf des Motors

SY Synchrone Lauf des Motors

E Einschalten der Erregung

U Klemmenspannung in Prozenten des Transformer-Verhältnisses

AT Linie, die den zeitlichen Verlauf der Klemmenspannung angibt

F Erreichen der vollen Spannung

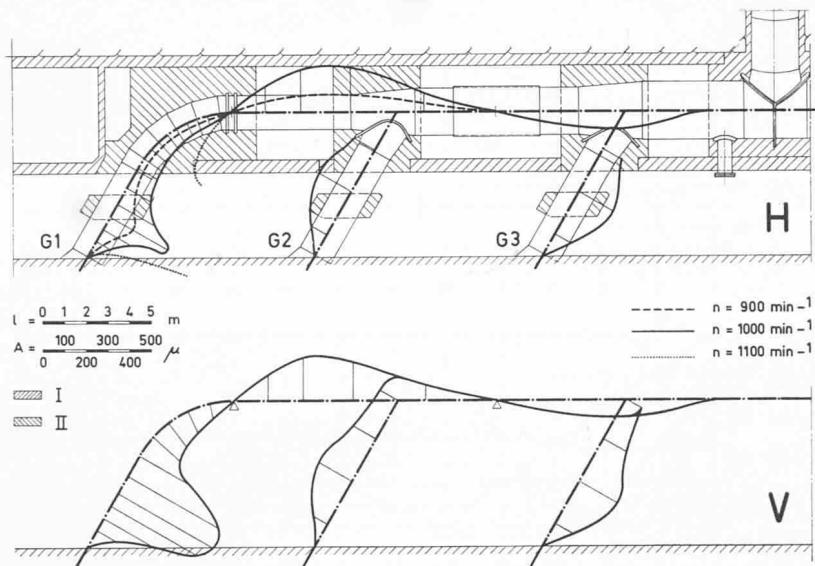


Bild 15. Schwingungen des Niederdruck-Sammelrohres und der Rohrstutzen bei Turbinenbetrieb der Gruppe 1 vor dem Betonieren

- G1, G2, G3 Stutzen der Gruppen 1, 2, 3
 H Gemessene Horizontalkomponenten der Amplituden
 V Gemessene Vertikalkomponenten der Amplituden
 I Mauern und Fundamente aus Beton im Zeitpunkt der Schwingungsmessungen (erste Versuche)
 II Zusätzliche Einbauten aus Beton, ausgeführt nach den ersten Messungen, jedoch vor der ersten Betriebsperiode
 I Längenmaßstab
 A ungefährer Maßstab der Amplituden

digkeitsregler und der Ölpumpengruppe mit elektrischem Antrieb für die Schmierung des Spurlagers und der übrigen Lager sind folgende Zubehörteile zu nennen, die in unmittelbarer Nähe der Turbinen-Pumpe angeordnet wurden:

- eine Batterie von Absperrorganen und Ventilen, die die Vorgänge des Füllens und Entleerens der Laufräder während des Betriebes ermöglichen,
- eine Druckluftanlage mit elektrisch angetriebenem Kompressor (17 PS; 30 atü) und Windkessel von 2,3 m³,
- zwei Motor-Pumpen, wovon eine Reserve, für die Versorgung der Wellendichtungen sowie der Labyrinth-Dich-

tungen zwischen den Laufrädern und dem Gehäuse mit sauberem Sperrwasser.

Ausserdem ermöglichen ein Kugelschieber und eine Klappe, die in die Stutzen der Hochdruck- bzw. Niederdruck-Verteilleitungen eingebaut sind, die Maschinengruppe wenn nötig von der übrigen Anlage zu trennen. Gegenwärtig wird die Gruppe ausschliesslich von Hand betätigt. Die Lieferfirma hat eine Bedienungsvorrichtung angebracht, welche einige Verriegelungen vornimmt und so falsche Schaltvorgänge verhindert. Die automatische Steuerung, die für die Fernbedienung unerlässlich ist, steht in Entwicklung und soll im Jahre 1970 in Betrieb kommen.

3.8. Zubehöranlagen

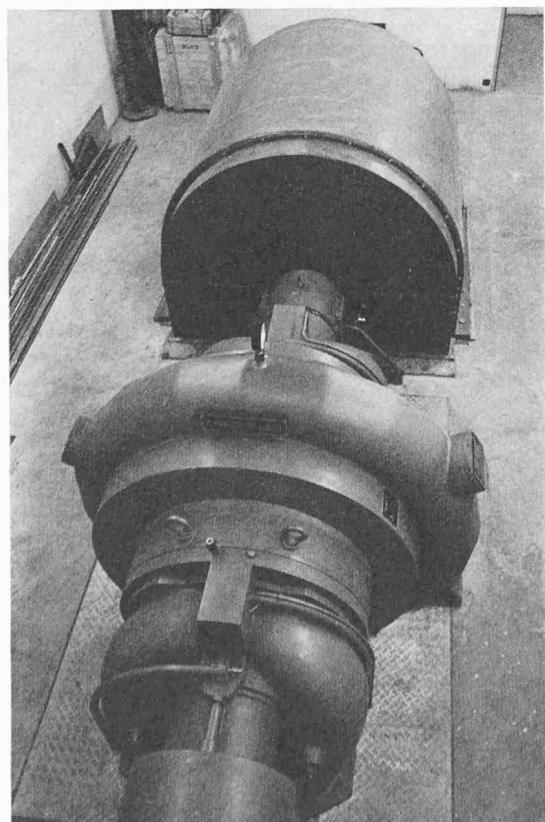
Die Zentrale Robiei ist mit folgenden Zubehöranlagen ausgerüstet:

- eine Kühlwasser-Versorgungsanlage mit verschiedenen, elektrisch angetriebenen Pumpen (Installierte Leistung 350 kW)
- eine CO₂-Feuerschutz-Anlage für sämtliche Motor-Generatoren und Transformatoren mit elektrischem und pneumatischem Antrieb,
- eine Druckluftanlage für die Versorgung der pneumatisch betriebenen Organe (Bremsen der Hauptgruppen, Feuerschutzantrieb),
- eine Absperrklappe NW 3100 mm am Ende der Niederdruck-Verteilleitung, Pos. 25 in Bild 7b, die bei Revisionsarbeiten dieser Leitung, der Niederdruckschieber der Maschinensätze, der Saugstutzen und des Unterwasserschlosses geschlossen wird,
- eine Dieselmotor-Notstromgruppe für 700 kW bei 1500 U/min (870 kVA) zur Versorgung des Seilbahnantriebs (20 t) und der Hilfseinrichtungen der Zentrale mit elektrischer Energie für den Fall, dass die sekundäre Zuleitung von 16 kV zur Zentrale und zu den äusseren Werkanlagen ausfallen sollte. Der Dieselmotor erreichte im Probetrieb am Aufstellungsort dank seines Abgasturboladers die selbe Leistung wie auf dem Versuchsstand im Lieferwerk trotz des geringeren Luftdruckes auf 1900 m ü. M.,
- die nötigen Hebezeuge, von denen die bedeutendsten zwei Laufkranen von je 40 t Tragkraft im Maschinenraum sind, weiter ein Laufkran von 20 t in der Schieberkammer und ein Laufkran von 7,5 t für die «Isogyre»-Gruppe.

4. Das Betriebsverhalten der Anlage

4.1. Betriebsdauer

Die erste Betriebsperiode wurde Ende August 1968 abgeschlossen. Bis zu



Die Bilder 4, 11, 12, 14, 19 und 20 beruhen auf Aufnahmen des Ingenieurbüros Maggia

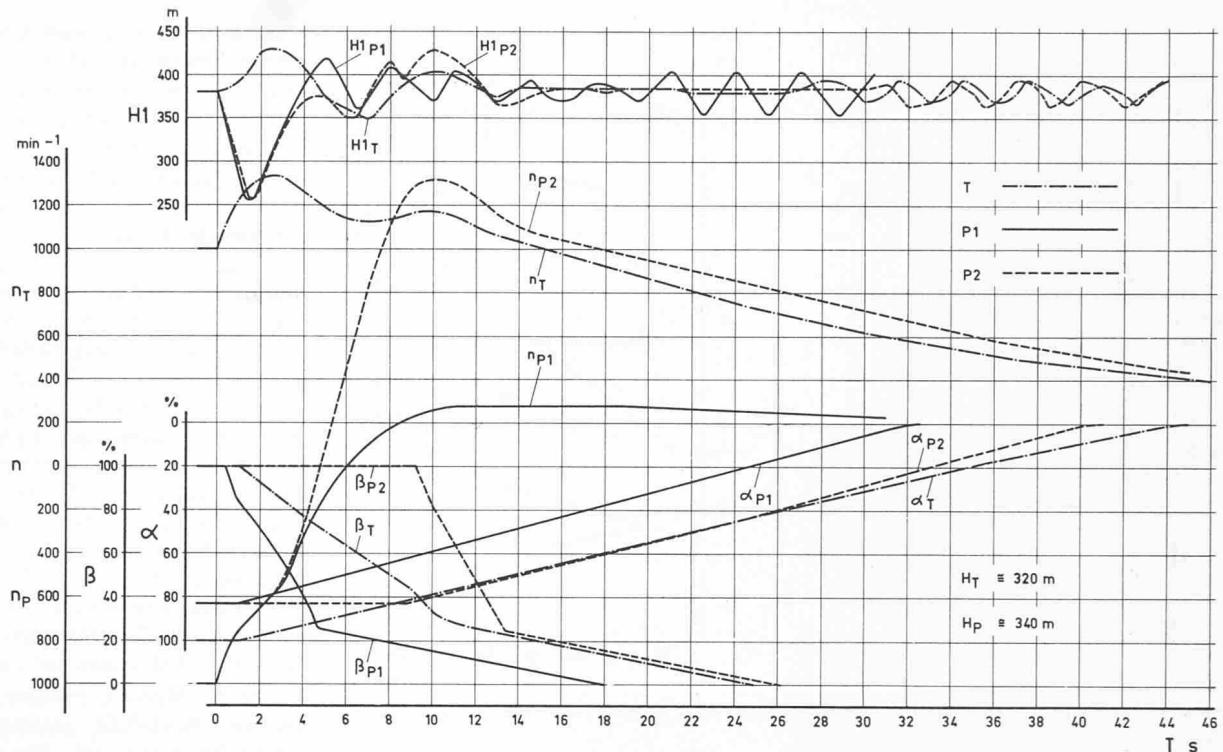


Bild 16. Entlastungsversuche mit einer umsteuerbaren Gruppe, die einmal als Pumpe, ein zweites Mal als Turbine arbeitete
 H1 Druckverlauf in der Hochdruck-Verteilleitung in m WS
 n Drehzahl in U/min
 α Öffnung des Leitapparates in Prozenten
 β Öffnung des Kugelschiebers in Prozenten
 T Index, der anzeigen, dass sich die dargestellte Grösse auf den Turbinenbetrieb bezieht
 P1 Index, der anzeigen, dass sich die dargestellte Grösse auf den Pumpenbetrieb bezieht, wobei das Schliessen des Hochdruck-Kugelschiebers gleichzeitig mit dem Ausschalten des Elektromotors erfolgt (Normalfall)
 P2 Index wie P1, jedoch für den Fall, dass die Schliessbewegung des Hochdruck-Kugelschiebers durch den Sicherheitsregler, also erst nach Umkehr der Drehrichtung und Erreichen der eingestellten Überdrehzahl ausgelöst wird (Sonderfall bei Versagen von Sicherheitsvorrichtungen)

diesem Zeitpunkt betrug die Betriebsdauer der Hauptgruppen 830 h (Gruppe 1) bzw. 117 h (Gruppe 4). Die Gruppe «Isogyre» konnte erst später in Betrieb genommen werden und befindet sich noch im Versuchsstadium.

4.2. Inbetriebsetzung, Erschütterungen der Verteilleitungen

Bei den ersten Versuchen mit der Gruppe 1 als Turbine im Leerlauf traten Erschütterungen an der Niederdruck-Verteilleitung und an deren Stutzen auf. Aufgrund von Messungen der Lieferfirma der Turbine konnte festgestellt werden, dass das ganze Niederdruck-Rohrleitungssystem Schwingungen mit einer Frequenz von 31 Hz ausführte, und zwar unabhängig von der Drehzahl der Maschine. Bild 15 gibt eine genaue Vorstellung dieser Erscheinung.

Man musste mit allen Mitteln die unzulässig grosse Schwingungsamplitude durch eine starke Versteifung des Sammelrohres verringern. Dazu wurden einzelne Stücke dieses Rohres durch Auffüllen der hiefür vorgesehenen Ausparungen mit Beton verstellt. Auf diese Weise gelang es, die Resonanzen völlig zum Verschwinden zu bringen, so dass die noch verbleibenden Schwingungen nur noch geringe, durchaus zulässige

Spannungen in den betreffenden Rohrteilen hervorrufen.

Als man später mit einer und mit mehreren, als Turbinen betriebenen Gruppen zu Belastungen über 80% überging, traten an der Hochdruck-Verteilleitung starke Schwingungen auf, verbunden mit einem unzulässigen Lärm in der Schieberkammer. Eine erste Messreihe liess die Grundfrequenz im sehr komplexen Spektrum dieser Schwingungen erkennen. Sie ist gleich derjenigen der Druckschwankungen in der Verteilleitung und stimmt genau mit der zweiten Harmonischen der Pulsationen überein, die von den sieben Laufschaufeln herrühren; ihre Frequenz ist $1000/60.7 = 116.9$ Hz.

Weitere Messreihen, die durch Berechnungen ergänzt wurden, zeigten die Notwendigkeit, den Schwingungsbereich einzuschränken, was durch weitere Befestigungsarbeiten bewerkstelligt wurde, die bezwecken, die Massenträgheit der Leitung zu erhöhen. Diese Arbeiten sind jetzt fertiggestellt. Ihre Wirksamkeit wird bei der nächsten Inbetriebsetzung feststellbar sein.

4.3. Der Betrieb der umkehrbaren Hauptgruppen

Beim Turbinenbetrieb stellte das An-

fahren ein einziges Problem: Es mussten die Wirkungsweisen der verschiedenen Synchronisierungsapparate besser aufeinander abgestimmt werden, da der Zeitbedarf für den automatischen Ablauf der einzelnen Operationen den Erwartungen nicht entsprach.

Beim Leerlauf und beim Betrieb mit schwacher Last, wo der Leitapparat nur wenig geöffnet ist, erzeugt die Pumpenturbine auf der Saugseite starken Lärm. Dieser verringert sich über etwa $1/4$ -Last in dem Masse, wie die Last weiter zunimmt. Er nimmt einen Verlauf, der dem der Amplituden der Druckpulsationen nach dem Laufrad vergleichbar ist, die von den Fachleuten der Lieferfirma gemessen wurden [11]. Bei einer Leitrad-Öffnung von über 80%, wo der Ablauf aus dem Leitrad geräuscharm ist, treten in der Hochdruck-Verteilleitung die Schwingungen auf, von denen oben die Rede war; sie nehmen rasch zu und erzeugen einen Lärm, der jede akustische Verständigung in der Schieberkammer verunmöglicht.

Der Pumpenbetrieb ist im Gegensatz zum Turbinenbetrieb stabil und ruhig. Auf der Saugseite arbeitet die Maschine besonders geräuscharm; auch auf der Hochdruckseite sind fast keine Schwin-

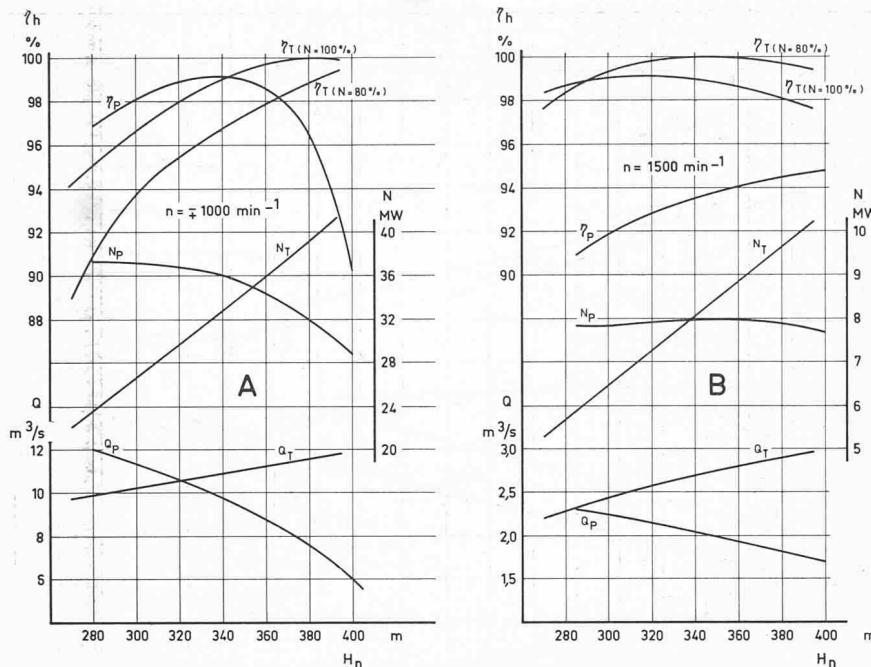


Bild 17. Verlauf der charakteristischen Größen in Abhängigkeit vom Nettogefälle nach den Garantien der Lieferfirmen

A Pumpen-Turbine 37 MW, 1000 U/min

B Turbinen-Pumpe «Isogyre» 10 MW, 1500 U/min

H Nettogefälle, bzw. manometrische Förderhöhe in m WS

Q Wasserstrom in m^3/s

η hydraulischer Wirkungsgrad in Prozenten des maximalen Wirkungsgrades

T Index für Turbinenbetrieb

P Index für Pumpenbetrieb

N_T bzw. N_P Turbinenleistung bzw. Leistungsbedarf der Pumpe

($N = 100\%$) Index für einen Betrieb bei der vollen Leistung N_T

($N = 80\%$) Index für einen Betrieb bei auf 80% verringelter Leistung

gungen festzustellen, solange die Maschine mit den durch das Gefälle vorgeschriebenen Leitradöffnungen arbeitet, die stets unter 80% der vollen Öffnung liegen. Das ist nicht der Fall beim Anlauf, im besondern während der Phase, wo das mit Wasser gefüllte Laufrad mit voller Drehzahl umläuft und der Leitapparat geschlossen ist. Alsdann ist der Leistungsbedarf etwa 30% desjenigen bei voller Förderung. Die Vernichtung dieser Leistung erschüttert die Maschine

und die benachbarten Anlageteile. Die nötige Verbesserung bestand im Abkürzen der kritischen Phase, wie das aus dem Vergleich der Diagramme II und III von Bild 13 hervorgeht.

Entlastungsversuche mit einer und nachher mit zwei Gruppen erlaubten, den zeitlichen Verlauf der Drücke und der Drehzahlen bei elektrischen Abschaltungen festzustellen. Bild 16 zeigt einige Ergebnisse dieser Messungen. Diese haben das Einhalten der von der

Lieferfirma abgegebenen Garantien bestätigt, soweit sie sich auf den Betrieb einer Gruppe allein beziehen.

Zwei Versuchsreihen zur Bestimmung der Wirkungsgrade bei zwei verschiedenen Gefällen und im Pumpenbetrieb bei verschiedenen Drehzahlen haben befriedigende Ergebnisse gezeigt [11]³. Die garantierten Leistungen und Wirkungsgrade sind bei Turbinenbetrieb erreicht worden. Im Pumpenbetrieb überschreitet der Leistungsbedarf um einige Prozente die durch die geltenden Normen festgesetzten Toleranzgrenzen, was aber keine nachteiligen Folgen hat, da der Motor stark genug bemessen wurde. Der ausgeglichene Wirkungsgrad bei Pumpenbetrieb bleibt innerhalb der unteren Toleranzgrenze und erreicht den garantierten Wert von 88,7%, wenn man die Korrekturen berücksichtigt, die sich aus der nicht gleichmäßigen Energieverteilung im Messquerschnitt ergeben.

Beim Motor-Generator entspricht die bei Beharrung gemessene Erwärmung den Garantien. Die elektrischen Vorrichtungen für das Anfahren befriedigen. Die Temperatur der Pole, die aufgrund von Farbänderungen von Spuren temperaturanzeigender Kreiden geschätzt wurde, erreichte nach einmaligem Anlaufen im Eisenkern und auf der ganzen Oberfläche 142 °C und nach zwei Anlaufvorgängen im Kern 170 °C; sie blieb damit innerhalb den von der Lieferfirma vorgesehenen Werten.

4.4. Feststellungen über den inneren Zustand der Pumpen-Turbinen nach der ersten Betriebsperiode

Nach der Demontage der Pumpen-Turbinen sind einige Mängel festgestellt worden, welche die Lieferfirma gegenwärtig zu beheben sich beeilt. Statt sie zu

³) Der Motor wurde dazu mit Strom von variabler Frequenz aus einem kleinen, nur für diese Versuche eingerichteten Netz gespiesen.

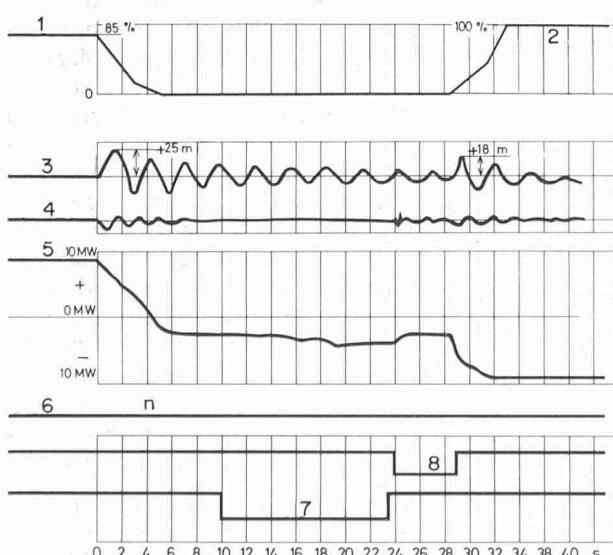


Bild 18. Zeitlicher Verlauf der charakteristischen Größen beim Umschalten der Turbinen-Pumpe «Isogyre» vom Turbinenbetrieb auf Pumpenbetrieb

- 1 Öffnung des Turbinen-Leitapparates 85 %
- 2 Öffnung des Pumpenschiebers 100 %
- 3 Druck auf Hochdruckseite
- 4 Druck auf Niederdruckseite
- 5 Leistung
- 6 Drehzahl (1500 U/min)
- 7 Füllen des Pumpenlaufrades
- 8 Entleeren des Turbinenlaufrades

beschreiben ist es interessanter, einige Lehren zusammenzufassen, die sich aus ihnen ergeben.

Es ist allgemein bekannt, dass die hydraulischen Kräfte sehr bedeutend sind, die auf den Leitapparat einer Pumpen-Turbine einwirken. Vor allem sind die Leitschaufeln hoch beansprucht; sie müssen daher nicht nur strömungstechnisch richtig sondern auch so geformt werden, dass sie diesen Beanspruchungen standhalten. Dabei ist zu beachten, dass bei gewissen Betriebszuständen Pulsationen des Wasserdrukkes auftreten können, die die Schaufeln zum Schwingen bringen. Es ist leicht einzusehen, dass ein Schaden eintreten kann, wenn eine Oberflächenstelle der schwingenden Schaufel eine feststehende Fläche, zum Beispiel eine Schutzplatte der Seitendeckel, berührt. Ohne Zweifel ist es im Falle einer Pumpen-Turbine viel schwieriger als in dem einer üblichen Francisturbine, jenes Spiel zwischen Schaufeln und Gehäusewänden festzusetzen, das einerseits nur geringe Randverluste und andererseits genügend Sicherheit gegen Berührung bei allen Betriebszuständen ergibt. Entsprechendes gilt auch für die axiale Führung der Leitschaufeln. Bei den Maschinen für das Kraftwerk Robiei sind in dieser Hinsicht interessante Lösungen verwirklicht worden.

Die Schwingungen, auf die oben hingewiesen wurde, übertragen sich von den Schaufeln auf das ganze Antriebssystem des Leitapparates. Daher stellen sich bei dessen Konstruktion Fragen der Be-messung und der Materialauswahl sowie solche der Oberflächenbehandlung.

Ein grosses Gefälle macht wirksame Labyrinthdichtungen erforderlich, um die Wasserverluste längs des Radumfanges klein zu halten. Richtig entworfen, können sie eine stabilisierende Wirkung auf das rotierende Rad ausüben. Hierüber konnten an den Turbinen des Kraftwerkes Verbano wertvolle Erfahrungen gesammelt werden. Diese sind bei der Konstruktion der Maschinen für das Kraftwerk Robiei verwertet worden.

4.5. Betriebserfahrungen mit der «Iso-gyre»-Gruppe

Diese Gruppe zeichnet sich vor allem durch ihren ruhigen Gang aus und zwar sowohl im Turbinen- als auch im Pumpenbetrieb. Die ersten Versuche erlaubten, die Aufeinanderfolge der verschiedenen Operationen bei den Vorgängen des Anfahrens, des Abstellens und des Übergangs von der einen in die andere Betriebsart zu verbessern. Die bisherigen Ergebnisse der Inbetriebsetzungsversuche haben gezeigt, dass die Lieferfirma die Probleme zu meistern versteht, die sich möglicherweise noch stellen werden. Die von ihr angepriesene

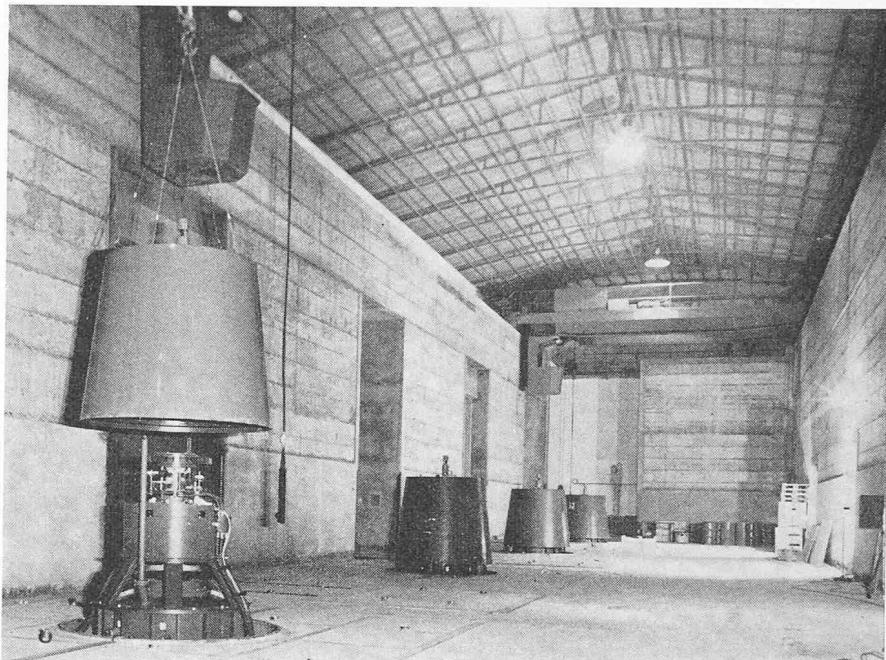


Bild 19. Maschinensaal Robiei während der ersten Betriebsperiode (Bauzustand 1968).

Anpassungsfähigkeit der gelieferten Maschine ist tatsächlich erreicht worden und zwar sowohl im Turbinenbetrieb bei einem Wasserverbrauch von $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$ als auch im Pumpenbetrieb bei einem Förderstrom von $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$, wobei das Leitungsnetz für einen Durchsatz von $50 \text{ m}^3/\text{s}$ bemessen ist. Der Verlauf der charakteristischen Daten beim Übergang vom Turbinen- auf den Pumpenbetrieb ist auf Bild 18 zu sehen.

Da während des Umschaltens von einer Betriebsart auf die andere der Achsialschub zeitweise seine Richtung ändern kann, musste das Spurlager mit einem doppelten Spurkranz versehen werden. Außerdem stellten gewisse Dichtungen einige Probleme, die gelöst werden konnten. Die gemessenen Wirkungsgrade, Bild 17, befriedigten nur teilweise. Sie wiesen auf gewisse Mängel hin, die die Lieferfirma zu beheben im Begriffe ist. Es wäre zu früh, schon jetzt daraus Folgerungen abzuleiten. Vorher müssen neue Versuche durchgeführt werden.

5. Schlussbemerkungen

Im vorliegenden Aufsatz werden die im Kraftwerk Robiei eingebauten Maschinen sowie deren Vorteile und die hauptsächlichsten Schwierigkeiten beschrieben, die bei ihrer Inbetriebsetzung aufgetreten sind. Wer über die zahlreichen Probleme erstaunt ist, welche die Lieferfirmen und die Bauherrschaft zu lösen hatten, sei daran erinnert, dass die mechanische und elektrische Ausrüstung des Kraftwerkes Robiei im Zeitpunkt der Auftragerteilung in mehreren Hinsichten eine Neuheit darstellten und dass die eingebauten Maschinensätze zwei stark verschiedenen Betriebsweisen zu genügen

haben. Diese Ausrüstung, für deren Konstruktion die Lieferfirmen grösste Sorgfalt aufwendeten, ist jetzt betriebsbereit. Der zukünftige Betrieb wird die Fragen beantworten, die der interessierte Fachmann allenfalls noch stellen könnte.

Die Pumpenturbinen in der Zentrale Robiei konnten anfangs Februar 1970 wieder in Betrieb genommen werden; seit dem 23. Februar laufen zwei Gruppen im regelmässigen Betrieb. Dabei hat sich gezeigt, dass das Anlaufverfahren als Pumpe nach Variante III von Bild 13 die erwarteten guten Resultate zeitigte und dass die starken, im Turbinenbetrieb aufgetretenen Schwingungen, von denen unter 4.2 die Rede war, dank dem Einbetonieren der Hochdruck-Verteilleitung verschwunden sind. Dies wurde namentlich auch anlässlich eines Vollastversuchs mit drei Einheiten festgestellt.

Wir schliessen mit dem Dank an die verantwortlichen Persönlichkeiten der «Officine Idroelettriche della Maggia», welche bereit waren, die Risiken auf sich zu nehmen, die mit einer völlig neuartigen Konstruktion verbunden sind. Sie ermöglichen mehreren Industrien unseres Landes, ihr Wissen und ihre technischen Erfahrungen zu vermehren und so ihre Stellung im internationalen Konkurrenzkampf auf dem Gebiete hydroelektrischer Maschinen zu festigen. Diese Art der Zusammenarbeit im Dienste der technischen Entwicklung verdient beachtet und von einer immer grösseren Zahl von Unternehmungen auch befolgt zu werden. (Literaturverzeichnis s. S. 230)

Adresse des Verfassers: Jean-Emile Graeser, Ing. dipl. EPUL, bei AG Ingenieurbüro Maggia, beratende Ingenieure, 6601 Locarno.

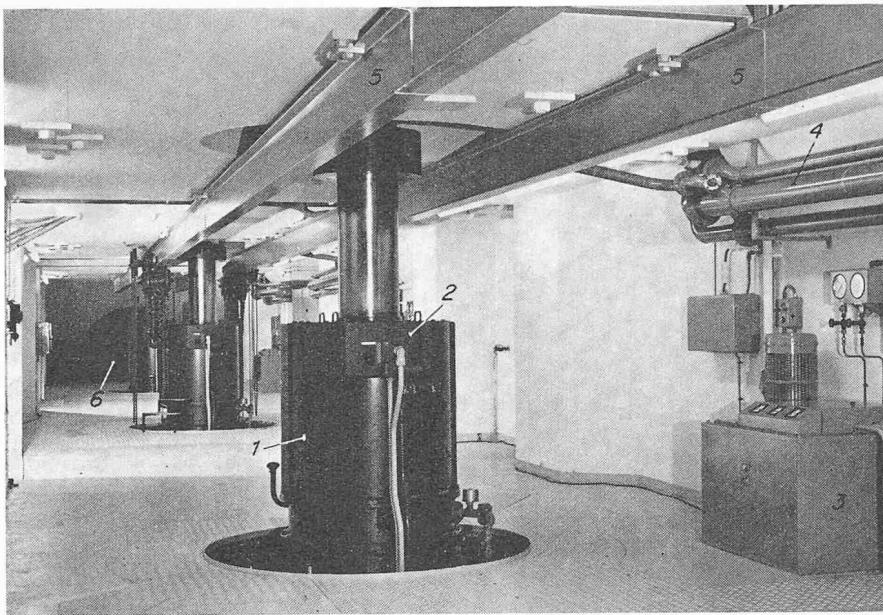


Bild 20. Umkehr-Pumpturbinen in betriebsbereitem Zustand vor der Wiederinbetriebnahme der Zentrale im Januar 1970

- 1 Umkehr-Pumpturbine Nr. 2
- 2 Überdrehzahl-Auslösevorrichtung, auf der Wellenverschalung aufmontiert
- 3 Kommandopult für die Leitapparatsteuerung
- 4 Schmierölleitungen
- 5 Demontageschienen mit bei der Gruppe Nr. 3 aufgehängten Flaschenzügen
- 6 «Isogyre»-Turbinenpumpe

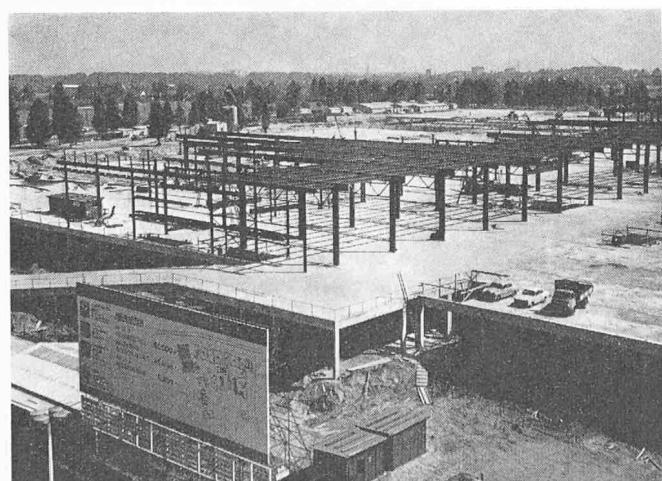
Literaturverzeichnis

- a) Betreffend die Kraftwerke Robiei im allgemeinen.
- [1] Geschäftleitung Maggia Kraftwerke AG: Weiterausbau der Maggia-Kraftwerke. «Wasser- und Energiewirtschaft» 56 (1964) Nr. 6, S. 155—164.
- [2] H. Lüthi und H. Fankhauser: Beitrag zur Entwicklung von Kavernenbauten. «Wasser- und Energiewirtschaft» 59 (1967) Nr. 8/9, S. 345—356.
- [3] Geschäftleitung Maggia Kraftwerke AG: Ausbauzustand der Kraftwerkgruppe Maggia im Frühjahr 1968. «Wasser- und Energiewirtschaft» 60 (1968) Nr. 7/8, S. 217—224.
- [4] OFIMA S.A., Locarno: Ampliamento Officine Idroelettriche della Maggia. Publikation der OFIMA.
- b) Betreffend die elektro-mechanische Ausstattung der Zentrale Robiei.
- [5] Charmilles S.A., Genève: Charmilles vous présente la turbine-pompe Charmilles («Isogyre»). Publikation der Charmilles S.A., Genève.
- [6] Charmilles Engineering Works Ltd.: A Method of calculation of the pressure surges in pumped-storage schemes equipped with «Isogyre» pump-turbines. «Technical bulletin» no E2.
- [7] A. Tschumi: Commentaires concernant l'«Isogyre» de Robiei. Discussion Symposium AIRH 1968 (distribution SIA), mai 1969; p. 80 et suivantes.
- [8] J. Chatelain, M. Jufer et A. Périllard: Groupes de pompage. Sécheron (Genève) 1968.
- [9] J. Chatelain, M. Jufer et A. Périllard: Techniques de démarrage des groupes réversibles à pôles massifs. «Revue générale de l'Electricité» (Paris) 1967, t. 76, no 11.
- [10] D. Florjancic and H. Waller: Experience with pump-turbines. Preprint Symposium IAHR 1968 (distributed by the SIA), juillet 1968.
- [11] D. Florjancic und H. Waller: Informationen über die Pumpenturbinen von Robiei. Discussion Symposium IVHF 1968 (Herausgabe SIA), Mai 1969, S. 87—89.
- [12] J. Chappuis: Organes d'obturation pour centrales hydro-électriques. «Bulletin technique Vevey» 25 (1965) no 1, p. 41 et 45.
- c) Veröffentlichungen der AG Ingenieurbüro Maggia, beratende Ingenieure, Locarno.
- [13] G. Trucco: Stollenbau durch Triasschichten — einige Beispiele und Erfahrungen. «Hoch- und Tiefbau» 67 (1968) Nr. 34.
- [14] R. Gartmann und G. Trucco: Essais sur modèles à trois dimensions pour la détermination des sous-pressions théoriques dans un barrage-poids avec joints évidés. Mitteilung an den internationalen Talsperrenkongress Istanbul 1967.
- [15] W. Liechti und W. Haeberli: Les sédimentations dans le bassin de Palagnedra et les dispositions prises pour le déblaiement des alluvions. Mitteilung an den internationalen Talsperrenkongress Montreal 1970 (wird später publiziert).
- [16] W. Liechti und E. Wullmann: Voile d'étanchéité à travers l'écoulement souterrain du lac de Sfundau pour l'augmentation de sa retenue. Mitteilung an den internationalen Talsperrenkongress Montreal 1970 (wird später publiziert).
- [17] ***: Staumauer zum Hochwasserschutz eines Alpentales. SWV-Verbandsschrift Nr. 42: Schweiz. Talsperrentechnik, herausgegeben vom Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband Baden, erscheint im Juni 1970.

Neue Ausstellungshalle der Hannover-Messe

DK 725.91

Zurzeit entsteht auf dem Messegelände in Hannover eine Ausstellungshalle, die – sowohl was die Grösse des Bauobjekts als auch was die technischen Belange betrifft –



besondere Aufmerksamkeit verdient. Bereits zur Hannover-Messe 1970 wird die Ausstellungshalle von der einschlägigen Industrie belegt werden können.

Der Neubau (Bild 1) hat eine Grundfläche von rund 81 222 m². Im Grundriss ist die Halle in Z-Form gegliedert. Der Ostteil hat eine Breite von 165 m, der Mittelteil ist 60 m und der Westteil 135 m breit. Die Länge der Bauenteile insgesamt beträgt 225 m. Charakteristisch für den aufgeständerten Neubau ist die horizontale Unterteilung in drei Nutzungszenen mit dem Untergeschoss als Parkebene, der Hallenebene mit Versorgungsbereich im Dachraum zwischen abgehängter Decke und Dachdecke sowie der mit Büro-Appartements bebauten Dachebene.

Durch die angehobene Anordnung des Ausstellungsgebäudes wird eine Parkfläche für 2359 PW geschaffen. Da die Halle in Hanglage erbaut wird, müssen die Höhenunterschiede im Untergeschoss, der Parkebene, ausgeglichen werden. Dadurch ergeben sich lichte Höhen von 2,5 bzw.

Bild 1. Blick auf die in Bau befindliche Halle 1 der Hannover-Messe. Bauzustand August 1969