

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 81 (1989)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Kraftwerk Felsenau 1989  
**Autor:** Neukomm, Alfred / Marti, Mario / Walter, Hans Peter  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-940515>

### **Nutzungsbedingungen**

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

### **Conditions d'utilisation**

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

### **Terms of use**

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

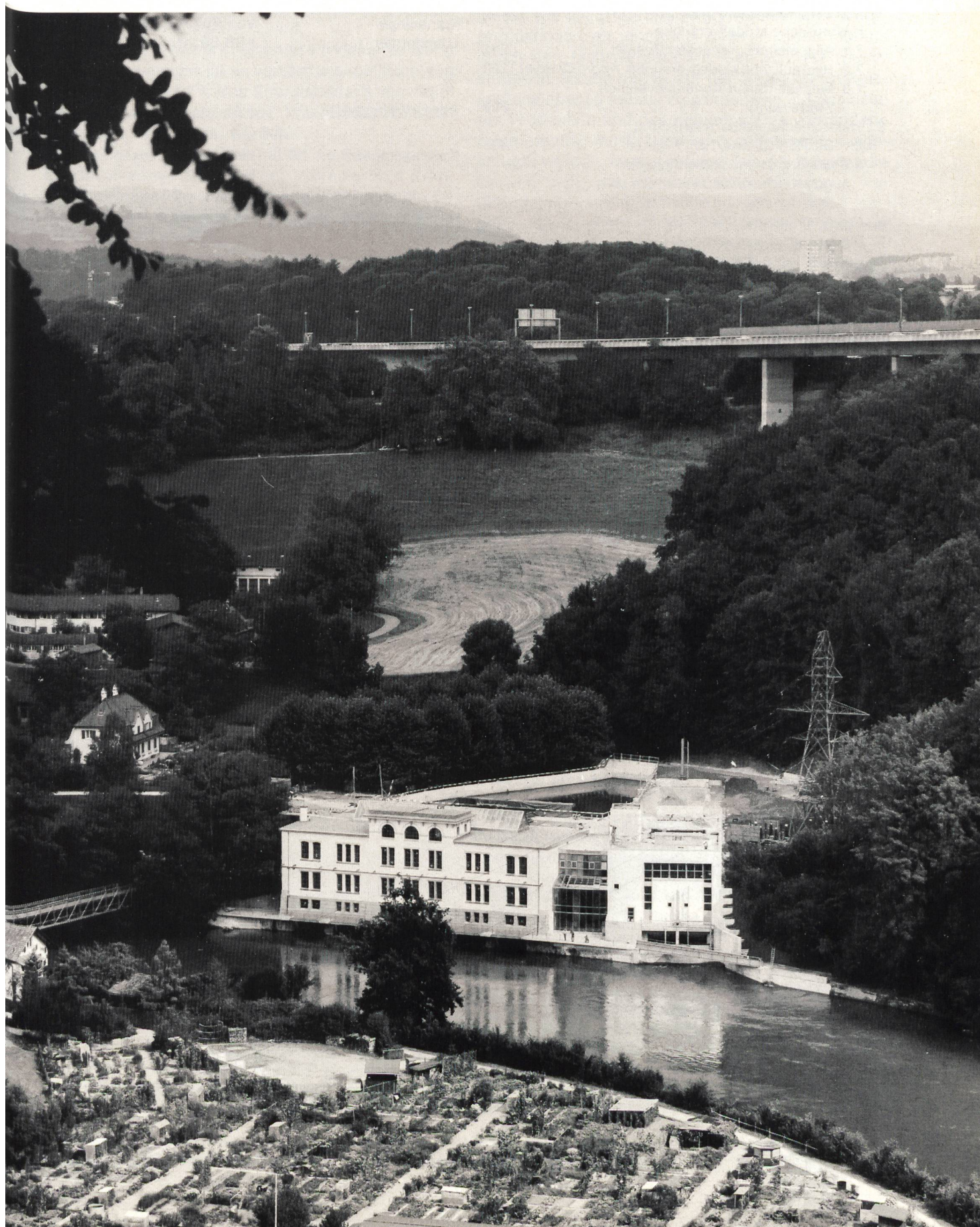
**Download PDF:** 10.02.2026

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

# Kraftwerk Felsenau 1989

**EWB**

Elektrizitätswerk  
der Stadt Bern



## Inhalt

	Seite
1. Vorwort. <i>Alfred Neukomm</i>	277
2. Zur Geschichte. <i>Mario Marti</i>	278
3. Die rechtliche Ausgangslage. <i>Hans Peter Walter</i>	282
4. Energiewirtschaftliche Bedeutung. <i>Jürg Vaterlaus</i>	284
5. Das Erneuerungsprojekt. <i>Werner Müller</i> und <i>Urs Stoller</i>	286
6. Baugrube und Baugrubensicherung. <i>Ueli Sennhauser</i> und <i>Urs Stoller</i>	289
7. Hydraulische Modellversuche	
7.1 Allgemeines. <i>Hanspeter Rohner</i>	291
7.2 Hydraulische Modellversuche. <i>André Chervet</i>	292
7.3 Modellturbinen-Abnahmeversuch. <i>Pierre Henry</i>	299
8. Elektromechanische Ausrüstung	
8.1 Die Rohrturbine. <i>Felix Fischer</i>	303
8.2 Generator und Nebenanlagen. <i>Josef Schwanda, Walter Staufer,</i> <i>Rolf Schäffer</i> und <i>Hubert Mächler</i>	306
9. Abwärmenutzung. <i>Walter Hirsbrunner</i>	310
10. Die Anlage im Wandel der Zeit. <i>Manfred Kienle</i>	312
11. Regulierungssysteme. <i>Hans Naeff</i>	315
12. Kunst im öffentlichen Raum. <i>Peter J. Betts</i>	319
13. Die Felsenau als Beispiel der Entwicklung der Wasserkraftnutzung. <i>Beat Strasser</i>	321
14. Architektur und Gestaltung. <i>Wladimir Grossen</i> und <i>Andreas Baumann</i>	323



**Kraftwerk Felsenau 1989**  
**Elektrizitätswerk der Stadt Bern**

## Am Bau Beteiligte

### Bauherr

EWB, Elektrizitätswerk der Stadt Bern, Bern

### Planer

Ingenieure	IUB Ingenieur- Unternehmung AG Bern
Architekten	<i>A. Baumann &amp; W. Grossen</i> , Bern
Modellversuche	Versuchsanstalt für Wasser- bau, Hydrologie und Glazio- logie, ETH Zürich Institut de Machines Hydrauliques et de Mécanique des Fluides, EPF Lausanne
Elektroprojekt	EWB, Installationsabteilung, Bern
Heizungs- und Lüftungsprojekt	TBZ, Technisches Büro für Zivilschutz, Bern <i>Walter Hirsbrunner</i> , Büro für Lüftungs- und Energietechnik, Bern
Bauphysik	Walther Bauphysik AG, Biel
Tropengarten, Flora und Fauna	<i>H. Triet</i> , Bern
Tropengarten, Technik	Steraplan AG, Muri BE
Kunstobjekt	<i>Ch. Rothacher</i> , Aarau

## Maschinenlieferanten

Generator und Steuerung	ABB, Asea Brown Boveri AG, Baden
Turbine	SEW, Sulzer-Escher Wyss AG, Zürich
Schützen	Buss AG, Pratteln Bieri AG, Liebefeld
Entleerungspumpen	Sulzer AG, Bern
Krananlage	Von Roll AG, Bern
Transformer	ABB Sécheron SA, Genf

## Installationen

Elektroanlagen	EWB Installationsabteilung, Bern
Heizung	Böhlen + Co. AG, Bern
Lüftung	Badertscher & Co., Bern
Sanitär	Ramseyer + Dilger AG, Bern

## Baufirmen

Tief- und Hochbau	Losinger Bau AG, Bern
Betonelemente	Element AG, Bern
Betonsanierung	Renesco AG, Bern
Kernbohrungen	Gehrig & Salzmann, Herrenschwanden
Gerüste	Lawil AG, Bern
Fenster und Fassadenbau	Gebr. Müller AG, Bern
Oberlichter und Innenverglasungen	Joss + Co., Bern
Türen	Schreinerei Geiser AG, Bern
Flachdach	Bizzozero + Mollet AG, Bern
Spengler	Jäggi + Tanner AG, Bern
Zimmermann	Bigler + Cie. AG, Bern
Kunststeinböden	Realini Sohn AG, Biel
Plattenarbeiten	Andrighetto AG, Bern
Doppelböden	Lenzlinger Söhne AG, Uster
Gipser	W. Thomet & Cie. AG, Bern
Maler	Marco Mini, Bern
Rostschutzbehandlungen	MKS Schenker AG, Bern
Stahlkonstruktionen	Sawo Sägesser Worb AG
Metallbau	EWB Werkstatt
Metallbau	Loretan AG, Mamishaus
Metallbau	Schenk Metall, Niederwangen
Möbel	Oesch Innenausbau, Steffisburg
Gärtner	Gartenbau Künzli, Bern

## Versicherungen

Winterthur Versicherung, Bern
Mobiliar, Bern
Helvetia, Bern

Die Liste enthält die wichtigsten am Bau beteiligten Firmen;  
Unterlieferanten sind in der Regel nicht aufgeführt.

## 1. Vorwort

Mit der Einweihung der neuen Zentrale Felsenau wird eine Anlage wieder in Betrieb gesetzt, die dank Nutzung der Wasserkraft auf umweltschonende Art Strom erzeugt, indem der erneuerbare Energieträger Wasser optimal ausgenutzt wird.

Sicher ist das Kraftwerk Felsenau ein kleineres Werk. Nichtsdestoweniger ist es versorgungspolitisch von Bedeutung: rund 7% des Energiebedarfs der Stadt Bern können durch dieses Wasserkraftwerk auf Stadtboden abgedeckt werden.

Bereits vor einigen Jahren haben die Behörden und die Bevölkerung den Wert der hydraulischen Kraftwerke «vor der Haustüre» erkannt und zuerst die Erneuerung des Kleinkraftwerks Matte, das heute rund 1% der benötigten Energie liefert, in die Wege geleitet: mit dem Ersatz der veralteten Turbinen und Generatoren konnte der Wirkungsgrad verbessert und damit mehr Elektrizität bei gleicher genutzter Wassermenge produziert werden. Im Februar 1984 bewilligte das Volk mit grossem Mehr den Kredit zur Erneuerung der Zentrale Felsenau, die nun dem Betrieb übergeben werden kann. Auch hier darf mit einer Mehrproduktion von Energie gerechnet werden. Angesichts des in den letzten Jahren festgestellten Verbrauchszuwachses von jährlich 3% sind wir dafür dankbar. Die bereits eingeleiteten Sparbemühungen machen den Beitrag von Felsenau nicht überflüssig: Auch wenn die Zunahme sich 1988 auf rund 2% verringert hat und sich möglicherweise eine Trendwende ankündigt, bedeutet der verringerte Zuwachs keine Abnahme, ja nicht einmal ein Konstanthalten des Verbrauchs. Aktive Sparmassnahmen und die Nutzung von Abwärme- und Umweltenergien sind ein Muss und gehören zu meinen primären energiepolitischen Zielsetzungen.

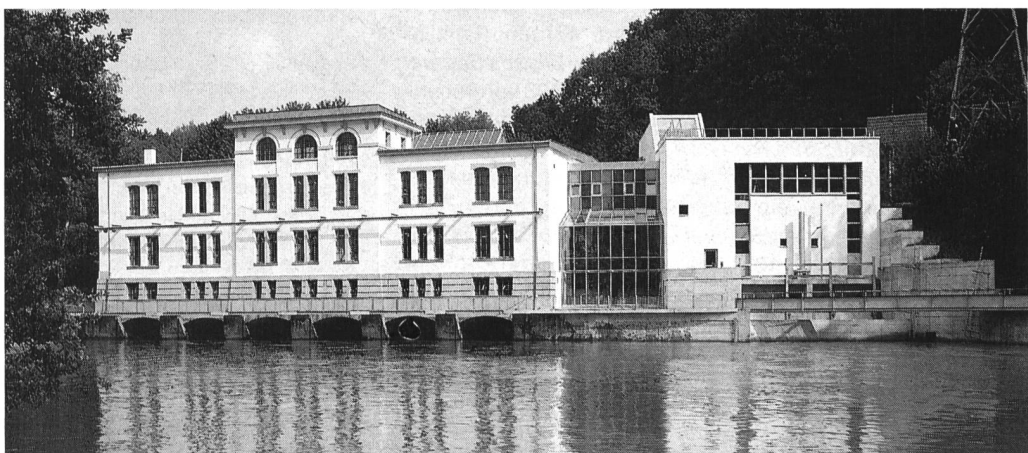
Nur wenige Länder produzieren einen so hohen Anteil der elektrischen Energie aus Wasserkraft, doch, wie die Erzeugung von Strom in Kernkraftwerken, stossen auch bei der hydraulischen Energie neue Projekte oft auf Widerstand. Gerade das Beispiel der Felsenau hat mit der Diskussion um die Restwasser-

menge die Problematik des Ausbaus der Wasserkraft deutlich aufgezeigt: der Bau zusätzlicher Staustufen in den Flüssen bringt zwar eine gewichtige Mehrproduktion. Insbesondere das Ableiten von Wasser in Kanäle oder Stollen bringt jedoch auch Umweltfragen mit sich. Zudem werden mit kleineren Kraftwerken – seien es Wasserkraftzentralen oder Alternativanlagen – die Energieprobleme höchstens kurzfristig gelöst; wie die Erfahrung zeigt, werden deren Mehrproduktionen oft innerhalb eines einzigen Monats durch den Mehrverbrauch in der Schweiz wieder eingeholt. Es gilt daher, auf der Seite des Energieparens ebenso kreativ zu werden wie auf der Seite der Produktion und des Konsums. Das vorhandene Sparpotential muss fach- und zeitgerecht ausgeschöpft werden, denn gesparte Energie belastet die Umwelt nicht und macht uns unabhängiger von Energieimporten.

Mit der Erneuerung der beiden Zentralen Matte und Felsenau sind heute die Möglichkeiten zur hydraulischen Energieerzeugung auf Stadtgebiet bei gleichzeitigem grösstmöglichem Schutz der Umwelt erschöpft. Zusätzlicher «eigener» Strom kann nur noch auf andere Weise, sei es in Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen oder mit Sonnenzellen, hergestellt werden. Es wird mich mit Genugtuung erfüllen, wenn ich dereinst ein Vorwort zur Einweihung von alternativen Stromerzeugungsanlagen, deren Planung und Bau wir fördern und unterstützen, schreiben darf. Abschliessend möchte ich allen, die zur Realisierung der gelungenen Sanierung beigetragen haben, meine Anerkennung und meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Fachleute des Elektrizitätswerks der Stadt Bern, Lieferanten, Ingenieur- und Bauunternehmungen sowie viele weitere Beteiligte haben mitgeholfen, dass wir am 20. Oktober 1989 die neue Zentrale Felsenau in Betrieb nehmen können. Eine gelungene Umgebungsgestaltung, die die Kunst im öffentlichen Raum zur Geltung kommen lässt, soll mithelfen, die technische Anlage in einen Bezug zur Umwelt zu setzen und so das Bewusstsein um die Abhängigkeiten zwischen Natur und Technik, zwischen Leben und Energie mit künstlerischen Mitteln widerzuspiegeln.

Gemeinderat *Alfred Neukomm*,  
Direktor der Stadtbetriebe Bern

Bild 1-1. Die alte (links) und die neue Zentrale Felsenau vom gegenüberliegenden Aareufer aus gesehen.  
(Foto: Rolf Schlättli)



## 2. Zur Geschichte

Mario Marti

### Zusammenfassung

*Eine kurze Besitzergeschichte der Felsenau. Der Beginn der Industrialisierung, private Bestrebungen um die Nutzung der Wasserkraft. Bemühungen der Einwohnergemeinde Bern um den Bau eines Kraftwerks zur Sicherung einer gewissen Autonomie bei der Stromversorgung.*

### Résumé: Une brève histoire

*Une brève histoire des propriétaires des terrains de la Felsenau. Les débuts de l'industrialisation, les efforts des particuliers pour s'approprier les droits de l'utilisation de la force hydraulique. Comment la municipalité de Berne a pu obtenir le droit de construire une usine électrique afin d'assurer une certaine autonomie dans ses besoins énergétiques.*

### Summary: A short history

*A short history of the owners of the Felsenau estate. The beginning of industrialization; private efforts to exploit waterpower. Struggle of the community of Berne to build a power station ensuring a certain independence in energy.*

Die Engehalbinsel wurde schon früh von Menschen als fester Aufenthaltsort gewählt (belegt durch Funde aus keltisch-römischer Zeit), wohl vor allem wegen ihrer besonderen, geschützten Lage; nur gerade aus südwestlicher Richtung ist sie ohne Überquerung der Aare erreichbar. Andere, aber eben auch aus dem Verlauf der Aare sich ergebende Erwägungen haben später zur Ansiedlung von Industrien und zur Ausnutzung der Wasserkraft geführt.

Die Aare schliesst mit einer Schlaufe mit vielen Richtungsänderungen die Halbinsel fast vollständig ein. An der engsten Stelle beträgt der Abstand nur etwa 500 m, der Höhenunterschied des Aareniveaus etwa 12 m (zurückgelegte Distanz der Aare etwa 7,5 km).

### Vom Landgut zur industriellen Nutzung

Mindestens seit dem 17. Jahrhundert befand sich in der jetzt als Felsenau bezeichneten Gegend ein Landgut (im Raume der heutigen Fahrstrasse/Strandweg). Für die ursprüngliche Bezeichnung «Burgau» ist bisher keine zweifelsfreie Erklärung gefunden worden. Die späteren Bezeichnungen «Schmalzenloch» und «Dübis Loch» dagegen können auf Besitzer des Landgutes zurückgeführt werden (Familie Schmalz etwa 1698 bis 1795; Handelsmann Elisäus Samuel Dübi 1795 bis 1808). Dübis Erbe blieb nach 1808 vorerst unverteilt, später übernahm es einer der Schwiegersöhne, Oberstlieut. Carl Ludw. von Graffenried. 1820 kaufte Chorrichter Johann Studer von Niederösch das Gut; er erwarb 1823 die Konzession, ein Fährschiff halten zu dürfen. Der nächste Eigentümer war Samuel Gottlieb Gerber, Vater, der das Gut am 1. Januar 1831 erwarb und mit dem von ihm «Felsenau» genannten Gut eine Familienkiste<sup>1</sup> errichtete. Infolge der Änderung des Rechts der Familienkisten wurde die Felsenau bereits am 1. Januar 1838 an Hauptmann Ad.

Ludw. Gerber-Osterrieth weiterverkauft, der sie seinerseits 1841 an die Gebrüder Eduard und Friedrich Wyss, Rotgerber<sup>2</sup> von und in Bern, veräusserte. Noch im selben Jahr ersuchten die Gebrüder um die Erteilung der Bewilligung zum Bau «einiger zur Errichtung einer Gerberei und Leimsiederei bestimmter Gebäude auf dem Felsenau-Guthe in der Enge (Länggass III. tel.)»<sup>3</sup>. Zum Betrieb der Lohstampfe und Lederwalke wollten die beiden einen Wasserkanal (Tunnel) graben lassen; am 22. Dezember 1841 richteten sie ein entsprechendes Gesuch an den Burgerrat. Die «Forst Commission» beschrieb das erstmals auftauchende Tunnelprojekt zur Gewinnung von Wasserkraft in ihrem Vortrag an den Burgerrat wie folgt: «... In Folge nemlich der von den Herren Wyss auf ihrem Guthe Felsenau beabsichtigten Bauten und Einrichtungen von Wasserwerken als wie Lohstampfe, Lederwalke etc. haben dieselben zu Herbeyschaffung des dazu benötigten Wassers die Grabung eines unterirdischen Canals und zu dem Ende den Durchstich der dasigen zwischen der Aare befindlichen Landzunge... als das Zweckdienlichste erachtet. Die Länge des Canals würde nach stattgefundener Messung betragen: 2127 Schweizer Schuhe<sup>4</sup>, die Tiefe vom höchsten Punkte angenommen ca. 219 Schuhe...». Die Forst Commission hatte keine Bedenken bezüglich Einsturzgefahr des Tunnels und war für die Erteilung der Bewilligung.

Wie weit damals der Tunnelbau verwirklicht worden ist, kann aus einer späteren Serie von Leserbriefen im Intelligenzblatt<sup>5</sup> abgeleitet werden, derzufolge der «in früheren Jahren begonnene Durchstich der sogenannten Enge bei der Felsenau»<sup>6</sup> durch die Gebrüder Lanz vollendet werden sollte. Offenbar waren sowohl Tunnelleingang wie -ausgang bereits vorhanden, ein Tunnel zwar noch nicht fertiggestellt, wohl aber umfangreiche Arbeiten geleistet worden. Der Zusammenhang zwischen dem Geltstag<sup>7</sup> der Gebrüder Wyss und der Einstellung der Arbeiten am Tunnel lässt sich nur vermuten; jedenfalls übernahm am 30. Oktober 1848 Friedr. Rud. Wyss, alt Salzfactor von Wangen, das Gut und verkaufte es 1857 seinem Schwiegersohn Joh. Friedr. Lanz-Wyss. Lanz publizierte mit seinem Bruder zusammen 1858 im Amtsblatt die Absicht, einen Tunnel zu erstellen, was zur oben erwähnten Polemik im «Intelligenzblatt» Anlass gab. Hauptstreitpunkte waren das Gefälle des Tunnels und die Wassermenge, welche der Aare entzogen würde. Die Gebrüder Lanz planten die Einrichtung einer Papierfabrik; die Gegner argumentierten, zum Antrieb von zwei Maschinen müsste der Aare soviel Wasser entzogen werden, dass die Holzflösserei erschwert würde. Im Jahr 1861 verkaufte Lanz den südlichen Teil der Felsenau an Carl Wilhelm von Graffenried. Er überliess Graffenried auch die Konzessionen betreffend Tunnelbau (von 1842) und eine Konzession betreffend Wasserrecht an der Aare (von 1859), die unter dem verkauften Landstück und unter der Engehalde vorhande-

2 Rotgerben: pflanzlich gerben (Rot- oder Lohgerben), kommt besonders für kräftige Ledersorten in Frage (Treibriemen, Sohlen)

3 Quelle: Aus dem Antrag seitens der «Einwohner Polizei Commission» an den Einwohnergemeinderat auf Erteilung einer Bewilligung. 10.11.1841

4 Schweizer Schuh = 0,3 m

5 «Intelligenzblatt für die Stadt Bern»

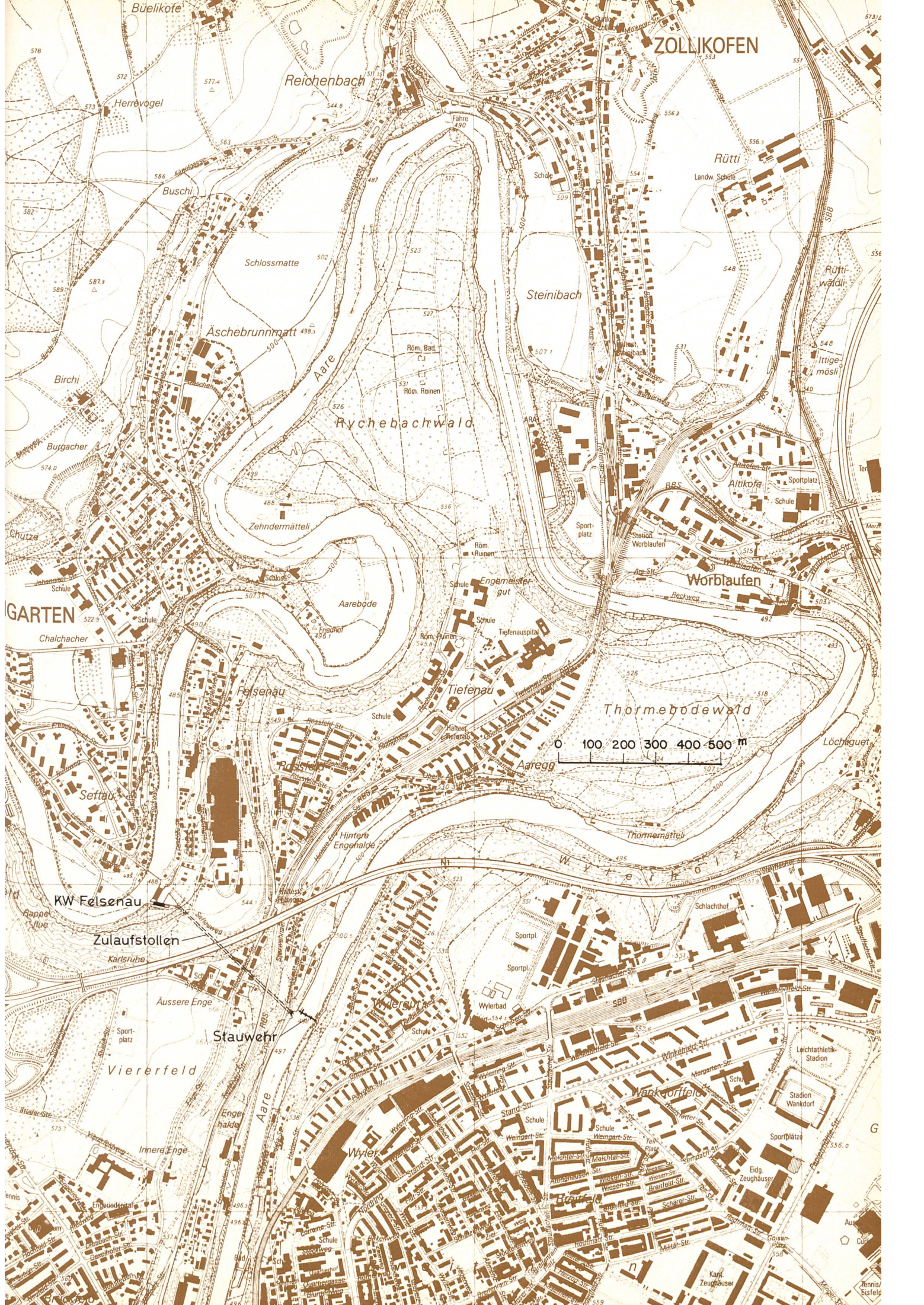
6 Zitat aus dem Leserbrief vom 23. November 1858 im «Intelligenzblatt für die Stadt Bern»

7 Geltstag: Bankrott

Bild 2-1, Seite 279. Karte 1:14400 der Aareschlaufe unterhalb Berns. Mit dem Zulaufstollen zum Kraftwerk Felsenau kann die 13 km lange Schlaufe abgeschnitten werden. Dadurch gewinnt man etwa 12 m Gefälle für die Stromproduktion.

Reproduziert mit Bewilligung des Vermessungsamtes der Stadt Bern vom 31. 5. 1989.

1 Familienkisten: gewisse Stiftungen zur Sicherung von Vermögen; v.a. mit dem Zweck standesgemässer Erziehung von Familienangehörigen



nen (jedoch unvollendeten) Tunnelbauten und sämtliche die Tunnelanlage betreffenden Pläne und übrigen Akten. Auf dem nördlichen Teil entwickelte Lanz selber grössere Aktivitäten im Zusammenhang mit dem Betrieb seiner Brauerei. Die Brauerei benutzte verschiedene in Fels gehauene Keller, u.a. einen von 105 m Länge (!); ein Überrest aus der Zeit der Gebrüder Wyss?

Von den zwei Teilen des Felsenaugutes ist der südliche für uns von grösserem Interesse, weil hier eine Spinnerei und Anlagen zur Ausnutzung der Wasserkraft erbaut wurden. Am 10. Mai 1862 wurde der AG Felsenau (Spinnerei) die Konzession zur «Durchführung» eines Tunnels für die Wasserzufuhr und für die Ausnutzung von 500 Kubikfuss Wasser pro Sekunde erteilt. Ein Tunnel wurde gebaut, die Turbinen trieb man mit Wasserkraft an. Zehn Jahre später, in der Nacht vom 11. auf den 12. August 1872, ereignete sich ein schrecklicher Brand, das grosse Spinnereigebäude mit anstossendem Ofenhaus, Schmiede und Magazin brannte vollständig nieder; die Versicherungen mussten Entschädigungen von rund 2790000 Franken übernehmen.

Im März 1873 wurde der AG Felsenau (Nachfolgerin der Kollektivgesellschaft Henggeler, Graffenried & Cie.) eine neue Konzession für die Ausnutzung von jetzt 1000 Kubikfuss Wasser pro Sekunde erteilt.

### *Wem steht die Nutzung der Wasserkraft zu?*

Die AG Felsenau hat die Konzession für die Ausnutzung der grösseren Wassermenge nicht ausgenutzt.

1888 (9. April) reichte sie ein Gesuch um Konzessionserteilung zur Einrichtung elektrischer Beleuchtung, eventuell auch Kraftübertragung, in der Stadt Bern und Umgebung an den Gemeinderat ein. Der Gemeinderat lehnte in der Absicht, auch der Gemeinde selber die Möglichkeit der Stromerzeugung in der Felsenau offenzuhalten, ab.

Anfang 1890 reichte die Maschinenfabrik Bern, Ludwig & Schöpfer, ein Konzessionsgesuch zur Nutzung der Wasserkräfte bei der Äusseren Enge und am Fusse des kleinen Bremgartenwaldes ein. Die Spinnerei Felsenau reagierte sehr schnell und reichte ebenfalls ein solches Gesuch ein.

Die Gemeinde widersetzte sich beiden Gesuchen und reichte ihrerseits, zur Sicherung der Kraftgewinnung in der Felsenau, ein entsprechendes Gesuch um Konzession ein, denn das «öffentliche Interesse erfordert, dass die Gemeinde, mit Rücksicht auf den öffentlichen Verkehr und auf öffentliche Einrichtungen, wie z. B. das Telefon und die elektrische Beleuchtung, die Erstellung elektrischer Stromleitungen in der Hand behalte. Die neutrale Stellung der Gemeinde bietet für die Förderung der Industrie, wenn die elektrische Kraftübertragung von der Gemeinde besorgt wird, vollständige Gewähr. Ferner hat die Gemeinde durch ihren Beschluss über Erweiterung der Wasserwerkanlage an der Matte die Nutzbarmachung der Wasserkräfte der Aare und die Erstellung der elektrischen Beleuchtung in Regie im Prinzip genehmigt und der Gemeindebehörde den Weg für die Zukunft vorgezeichnet, denn es wurde schon damals darauf aufmerksam gemacht, dass die an der Matte gewonnene Wasserkraft nach aufgestellter Berechnung für ausgedehnte elektrische Beleuchtungsanlagen nicht genügt. Hierin liegt für die Stadtbehörde die Anleitung, dafür Sorge zu tragen, dass die Ausnützung der Wasserkräfte der Aare in Händen der Gemeinde bleibe» (Verwaltungsbericht der Einwohnergemeinde Bern für das Jahr 1890).

Die Konzessionsgesuchsteller reichten jeder gegen jeden Einspruch ein. Noch bevor die Kantonsregierung einen Entscheid gefällt hatte, sicherte sich die Einwohnergemeinde die Vorkaufsrechte der für die Wasserwerkanlage erforderlichen Terrains (die der Burgergemeinde gehör-

ten). Mitte 1891 zogen Ludwig & Schöpfer ihr Gesuch zugunsten der Spinnerei Felsenau zurück. Schliesslich gewährte der Regierungsrat die Bewilligung der Spinnerei Felsenau, allerdings unter wesentlichen Beschränkungen zugunsten der Stadt Bern.

Der Kanton forderte von den Konzessionsnehmern auch den Schutz der Bevölkerung vor gesundheitsschädigenden Einflüssen sowie Rücksichtnahme auf die Interessen der Fischerei.

1893 reichte die Spinnerei zwei verschiedene reduzierte Projekte ein und ersuchte ausserdem um Verlängerung der Konzession um zehn Jahre. (Die Spinnerei hätte somit erst nach zehn Jahren zur Erstellung der Turbinen angehalten werden können.) Der Gemeinderat setzte sich gegen die Fristverlängerung zur Wehr und reichte ein Gesuch um Abgabe von bis 400 PS der brachliegenden Wasserkraft ein. Schliesslich zog die Spinnerei alle Eingaben zurück, ohne allerdings auf die Konzession zu verzichten.

Zu jenem Zeitpunkt war die elektrische Beleuchtung in Bern übrigens bereits eingeführt (1891: erste elektrische Strassenbeleuchtung zwischen Hirschengraben und Zytglogge). Der Strom wurde im ersten Elektrizitätswerk der Stadt Bern in der Matte produziert. Auch dem Projekt *Allemann* der Stadt Bern von 1896 war kein Erfolg beschieden; die Spinnerei Felsenau und deren Darlehensgeberin, die Eidgenössische Bank, erhoben Einspruch dagegen.

### *Der Durchbruch*

Die immer neuen Hindernisse und ständigen Verzögerungen veranlassten die Gemeinde schliesslich, andere Lösungen zu suchen. Einerseits wurde eine gewisse Strommenge vom Kanderwerk bezogen, andererseits 1903 die Dampfzentrale in der Matte erstellt, die vor allem im Winter betrieben wurde. Zudem wurde 1906 die Konzession für ein Kraftwerk in Wohlen erlangt. Das wirkte: Die Firma Gugelmann, welche 1904 die Aktienspinnerei Felsenau übernommen hatte, legte der Gemeinde ein günstiges Angebot vor. Endlich war die Bahn frei für die lange erhoffte Realisierung des Kraftwerks Felsenau. In der Botschaft an die Stimmbürger wurde wie folgt für das neue Werk argumentiert:

«Die gedeihliche Entwicklung unserer Stadt ist das Ziel; die Nutzbarmachung der Wasserkraft der Aare bei der Felsenau durch die Gemeinde, die diese Kraft in ihrer Hand haben wird, ist ein wesentlicher Faktor zur Erreichung dieses Zieles. Die Gemeinde gelangt heute, im allseitigen Einverständnis der Beteiligten, in den Besitz dieses Faktors, der die Aussicht auf eine lohnende Hebung der gewerblichen Tätigkeit in unserer Stadt eröffnet, und zwar ohne übermässige Anspannung unserer Kräfte und ohne Beeinträchtigung des Gleichgewichts in unserem Budget. Die Elektrizität wird, wie überall, so auch bei uns, einer der mächtigsten Hebel der wirtschaftlichen Entwicklung; das Geld, das für eine nicht bloss zweckmässige, sondern durch die Verhältnisse gebotene Erweiterung und Stärkung des Elektrizitätswerkes und zur Ausdehnung der gewerblichen Tätigkeit anspornende Vermehrung und Verbilligung der elektrischen Energie ausgegeben wird, wird sich nicht allein gut verzinsen, so dass es an sich schon als eine günstige Kapitalanlage zu empfehlen wäre, sondern es wird besonders dadurch fruchtbringend wirken, dass es die Lust zur gewerblichen Erwerbstätigkeit fördern und dadurch dem Wachsen des Wohlstandes die Bahn ebnen wird.»

In der Abstimmung vom 16. Dezember 1906 wurden der Vertrag mit der Firma Gugelmann ebenso wie ein Kredit von zwei Millionen Franken für die Erstellung des neuen Wasserkraftwerkes mit 5527 Ja gegen 690 Nein genehmigt.

Die Wassernutzungskonzession ging an die Gemeinde Bern über, sie war durch Regierungsratsbeschluss auf 40 m<sup>3</sup>/s erweitert worden; als Gegenwert erhielt die Spinnerei die unentgeltliche Lieferung von 800 Kilowatt Strom für so lange zugesichert, als die Maschinen der Spinnerei in Betrieb seien.

Wie schon bei den Projekten von 1890 und 1896, wurde auch 1906 mit der Notwendigkeit des Baus eines neuen Tunnels (d.h. derjenige der Spinnerei sollte nicht für das EW verwendet werden), eines Stauwehrs beim Einlauf des neuen Kanals und eines gänzlich neuen Werks an der Rappenfluh gerechnet. Der erste Ausbau war auf 3700 PS festgelegt und sollte 1909 fertiggestellt werden. Die Projektierung der Wasserbauten und des Stollens wurde Herrn Ingenieur Dr. *Locher* übertragen.

Den Jahresberichten der Elektrizitäts- und Wasserwerke können folgende Angaben über die Fortschritte des Baus entnommen werden:

1907

Januar	Terrainsondierungen (Bohrungen)
25. März	Bau- und Gewerbepublikation
12. August	Eingang des bereinigten Projektes (östliche Verschiebung der Zentrale und Aufbau der Schalträume)
23. Oktober	Beginn der Bauarbeiten am Stollen
28. Oktober	Beginn der Bauarbeiten am Wehr

Auf Jahresschluss war auf der Wehrseite die Zufahrtsstrasse zum grössten Teil erstellt und die Entwässerung der Berghalde im Gange. Die Montagebrücken für das Wehr waren ausgeführt, die Caissons der Widerlager betoniert und die maschinellen Installationen für die pneumatischen Fundationen nahezu vollendet. Der Richtstollen (als Firststollen von der Zentralenseite aus vorgetrieben) wies eine Länge von 116 Metern auf.

1908

20. Januar	Beginn der Arbeiten am Einlauf
12. März	Beginn der Betonierungsarbeiten für den Unterbau des Maschinenhauses
6. Mai	Durchschlag des Stollens am Ostportal
9. Oktober	Beendigung der Bassinmauern und der Überlaufmauer
1. November	Maschinenhaus-Hochbau inklusive Bedachung im Rohbau vollendet
11. Dezember	Beginn der pneumatischen Fundierung (Versenkung von Caisson Nr. 1) der Einlaufschwelle
15. Dezember	Vorlage des Abänderungsprojektes Fischpass

Auf Jahresende konnte die Fundierung der Widerlager und Pfeiler vollendet werden. Das Einlaufportal und die schiefen Flügelmauern des Einlaufbassins waren fertig betoniert. Stollen Ostseite: Vollaussbruch 45 m weit; Stollen Westseite: Vollaussbruch 330 m weit, Gewölbemauerung 318 m.

1909

2. März	Beginn der Turbinenmontage
11. Mai	Beginn der Montage der elektrischen Maschinen
19. Mai	Vollendung der Mauerung des Stollengewölbes
27. Mai	Turbinen und Regulatoren fertig aufgestellt
6. Juni	Vollendung der Betonsohle des Stollens
25. Juni	Vollendung der Kabelanlage Felsenau-Stadt

21. Oktober

Erste Füllung des Stollens und des Wasserbassins

5. November

Vorläufige Kollaudation des Werks (mit Ausnahme der Wehranlage) durch die Behörden

6. November

Beginn der Stromabgabe nach der Stadt

1910

Gemäss Bauprogramm waren die Erstellung des Stichbodens, des Steinwurfs und der linken Ufermauer unterhalb des Wehrs, nach Inbetriebsetzung des Werks, auf den Winter 1909/1910 festgesetzt. Diese Arbeiten sowie die noch nicht vollendeten Eisenkonstruktionen des Wehrs konnten 1910 erst nach Überwindung grosser Schwierigkeiten infolge des hohen Winterwasserstandes und verschiedener Hochwasser beendet werden.

Am 5. November 1909 hatte also in Anwesenheit des Stadtpräsidenten *von Steiger* die Kollaudation des Werks stattgefunden, welches in den folgenden Jahrzehnten zuverlässig seinen Teil an die Stromversorgung der Stadt Bern beibringen sollte.

1923 erteilte der Regierungsrat der Stadt eine zeitlich unbeschränkte Konzession zur Nutzung von 80 m<sup>3</sup> Wasser pro Sekunde.

1926 musste die Rechenanlage umgebaut werden. Die Maschinen wurden 1931/32 erneuert (Francis-Turbinen).

Wegen der drohenden Kriegsgefahr baute man 1939 zusätzlich ein unterirdisches Dampfkraftwerk in der Engehalde.

### Erneuerung notwendig

In den siebziger Jahren musste schliesslich die Revisionsbedürftigkeit verschiedener Teile des betagten Kraftwerks festgestellt werden. Besonders die baulichen Anlagen des Stauwehrs zeigten einen fortgeschrittenen Zerfall, während der elektromechanische Teil der Zentrale mit den inzwischen schon über 40jährigen Francis-Turbinen zwar veraltet, aber noch für zehn weitere Jahre brauchbar war. Entsprechend der Dringlichkeit und aus finanziellen Erwägungen wurde eine Sanierung in zwei Etappen vorgesehen. Am 25. September 1977 sprachen sich die Stimmbürger mit 41961 Ja gegen 3937 Nein für einen Kredit von 5,8 Mio Franken für die Durchführung der ersten Sanierungsetappe mit folgenden Arbeiten aus:

- Sanierung der baulichen und mechanischen Anlagen des Wehrs sowie Automatisierung der Wehrsteuerung
- Erstellen eines neuen Einlaufbauwerks und Einbau einer automatischen Rechenreinigungsanlage
- Sanierung des Schiffpasses, Renovierung der Fischtreppe

Die Arbeiten dauerten von November 1977 bis Sommer 1980.

Im November 1983 hiess der Stadtrat den 38-Mio-Franken-Kredit für die Erneuerung der Zentrale einstimmig gut. Die Gemeindeabstimmung über die zweite Etappe wurde auf den 26. Februar 1984 angesetzt. Kurz vor diesem Termin erfolgte eine Einsprache und vorsorgliche Gemeindebeschwerde seitens der Fischerei-Pachtvereinigung Bern und Umgebung, u.a. weil das Fehlen der fischereirechtlichen Bewilligung in der Abstimmungsbotschaft nicht erwähnt und der vorgesehene Baubeginn im Frühjahr 1984 nicht realistisch sei.

Ausserdem stellte die Fischerei-Pachtvereinigung bei der kantonalen Forstdirektion Antrag auf Erhöhung der Restwassermenge.

Der Gemeinderat der Stadt Bern hielt an Abstimmungster-

min und -botschaft fest, insbesondere weil die erste, von den Stimmberechtigten angenommene Etappe schon alles wasserrechtlich Relevante enthalten habe. Der Regierungsverwaltungsrat II von Bern wies die Gemeindebeschwerde ab, die Abstimmung konnte stattfinden; die Vorlage wurde mit 43182 Ja gegen 5329 Nein angenommen.

Gegen die zu starke Wassernutzung und den zu niedrigen Wasserstand im Bereich der Engehalbinsel wehrten sich nicht nur Fischervereine, sondern auch die Gemeinden Bremgarten, Ittigen und Zollikofen.

Wegen eines fehlenden Rodungsgesuchs und der noch fehlenden fischereipolizeilichen Bewilligung musste der Baubeginn schliesslich verschoben werden. Dank der Verhandlungsbereitschaft aller Parteien konnte eine akzeptable Lösung gefunden werden, wobei für die Stadt Bern aus der verdreifachten Restwassermenge (neu 12 m<sup>3</sup>/s) eine erhebliche Mindernutzung resultierte. Die Frage einer Entschädigung der Stadt für diese Einbusse ist derzeit noch nicht geregelt.

Im Mai 1986 konnten die Bauarbeiten für das neue Felsenau-Kraftwerk endlich in Angriff genommen werden.

#### Quellen:

Manuale des Gemeinderates der Stadt Bern

Manuale der Oberen Bürgerlichen Gemeindebehörde der Stadt Bern

Verwaltungsberichte der Gemeinde Bern

Jahresberichte der Elektrizitäts- und Wasserwerke der Stadt Bern

Botschaften des Stadtrates an die Gemeinde für die Gemeindeabstimmungen

«Geschichtliche Angaben zur dem Kartenblatt Felsenau-Neubrück» von Hans Morgenthaler in «Berner Zeitschrift für Geschichte und Heimatkunde» 1949, S. 104f

«Intelligenzblatt für die Stadt Bern», verschiedene Jahrgänge (Titel zum Teil leicht anderslautend)

«Der Bund», verschiedene Jahrgänge

«Berner Zeitung», verschiedene Jahrgänge

Adresse des Verfassers: Mario Marti, Mitarbeiter des Stadtarchivs, Jubiläumsstrasse 88, CH-3005 Bern.



Kraftwerk Felsenau 1989  
Elektrizitätswerk der Stadt Bern

### 3. Die rechtliche Ausgangslage

Hans Peter Walter

#### Zusammenfassung

*Die technische Nutzung der Wasserkraft ist in der Schweiz zunehmend Gegenstand rechtlicher Normierung, welche auch die Erneuerung von früher konzessionierten Anlagen erfasst und eine umfassende Interessenabwägung erheischt.*

#### Résumé: La base juridique

*L'utilisation des eaux en Suisse est toujours davantage soumise à des normes juridiques, qui influencent même le remplacement des installations techniques établies selon une concession en vigueur et qui demandent une pesée de l'ensemble des intérêts en jeu.*

#### Summary: The legal base

*Water power utilization in Switzerland is increasingly subjected to legal regulations which include even the replacement of technical installations based on an existing concession and obligate to weigh all the interests concerned.*

#### Das Problem

Natur und Technik stehen in einem ungebrochenen Spannungsverhältnis. Das Streben nach mehr oder verbessertem Komfort und die Steigerung der allgemeinen Nachfrage erheischen die Nutzung des verfügbaren technischen Fortschritts. Dieser wiederum bleibt im Regelfall nicht ohne Auswirkungen auf die natürlichen Lebensgrundlagen, was im Gegenzug der Sorge nach einer möglichst ungeschmälerter Erhaltung dieser Werte ruft. Unausweichlich, dass das Dilemma seine Schatten auch in die politische Landschaft und die daraus fliessende Gesetzgebung wirft. Dies gilt in besonderem Masse für die technische Nutzung der Wasserkraft. Die ihr dienenden Anlagen geraten leicht in Konflikt mit den Intentionen des Landschaftsschutzes oder sind geeignet, den natürlichen Wasserhaushalt zu beeinträchtigen. Der Gesetzgeber ist daher bestrebt, darüber ein Normgefüge zu errichten, welches den gegensätzlichen Interessen und den berechtigten Anliegen aller interessierten Kreise die mögliche und gebotene Rechnung trägt.

Die ausserhalb der Konzessionspflicht liegenden Schranken der technischen Wassernutzung begrenzen die Freiheit des Eingriffs in den natürlichen Zustand und gehören im weitesten Sinne dem Ordnungs- oder Polizeirecht an. Historisch gesehen stehen sie in der Regelungszuständigkeit der Kantone, sind im Laufe der Zeit aber zunehmend auch auf Bundesebene erlassen worden, meist im Rahmen einer eidgenössischen Grundsatzgesetzgebung. Zu erinnern ist etwa an die bundesrechtlichen Erlasse auf den Gebieten der Raumplanung [1], des Umweltschutzes [2], des Gewässerschutzes [3], der Forstpolizei [4] oder der Fischerei [5]. Sie führen die Ordnung des Bundesgesetzes über die Nutzbarmachung der Wasserkraft aus und weiter, wonach allgemein die Wassernutzung auf den Schutz der Landschaft und der Fischerei verpflichtet ist [6], und werden, soweit sie nicht selbst eine abschliessende Ordnung enthalten, durch kantonales Recht ergänzt.

Am 17. August 1923 wurde der Einwohnergemeinde Bern das Recht zur Nutzung des Aarewassers zwischen der Engehalde und der Felsenau verliehen. In der Konzessionsurkunde wurde die nutzbare Wassermenge auf 80 m<sup>3</sup>/s und

die im Aarebett zwischen Wehr und Unterwasserauslauf jederzeit zu belassende Wassermenge auf 4 m<sup>3</sup>/s festgelegt. Die Konzession ist nicht befristet, da das damalige Recht den Gemeinden ausdrücklich einen Anspruch auf zeitlich unbeschränkte Konzessionen gab, wogegen das geltende kantonale Gesetz bloss noch eine Höchstdauer von 80 Jahren zulässt [7]. Mit dieser Verleihung wurde der Konzessionärin ein wohlverworbenes Recht begründet, welches nach Massgabe des Bundesrechts einzig aus Gründen des öffentlichen Wohls und gegen volle Entschädigung zurückgezogen oder geschmälert werden kann [8]. Bei der Erneuerung der Zentrale Felsenau stellte sich daher die Grundsatzfrage, ob die zwischenzeitlichen Erlasse des eidgenössischen und kantonalen Ordnungsrechts den konzessionsmässig begründeten Rechten entgegengehalten und der Betreiberin weitergehende Pflichten auferlegt werden dürften. Sie war unter Vorbehalt der Entschädigungsfrage im Grundsatz zu bejahen. Die Antwort ergab sich einmal aus der Konzessionsurkunde selbst, nach welcher zusätzliche Auflagen im Interesse der Fischerei ausdrücklich zu beachten sind, daneben aus dem Vorbehalt im regierungsrätlichen Konzessionsbeschluss vom 17. August 1923 zugunsten der künftigen kantonalen und eidgenössischen Gesetzgebung über die Nutzbarmachung der Wasserkräfte und schliesslich aus den allgemeinen Grundsätzen des Ordnungsrechts. Immerhin wurde entgegen den Begehren der Einsprecher davon abgesehen, das Sanierungsvorhaben auch einer Umweltverträglichkeitsprüfung nach Art. 9 USG [2] zu unterstellen.

Die Sanierung der Kraftwerkzentrale wurde allerdings nicht allein durch neues materielles Recht erschwert. Zusätzliche Hindernisse ergaben sich aus dem in den letzten Jahren erfolgten Ausbau der Verwaltungsrechtspflege, namentlich der Erweiterung der Einsprache- und Beschwerdebefugnis zum Schutze auch bloss tatsächlicher Interessen oder der weitverstandenen Legitimation opponierender Verbände. Die reiche Ausschöpfung dieser Rechtsbehelfe durch Vereinigungen der Fischerei sowie des Natur- und Umweltschutzes, aber auch Interventionen von Nachbargemeinden führten bald einmal zu einer ungeahnten Verzögerung des Verfahrens und zu einem zermürenden Kleinkrieg an allen erdenklichen juristischen Fronten. Immerhin darf festgehalten werden, dass es letztlich gelang, in den streitigen Fragen einen Konsens zu finden und die Beschwerdeverfahren durch Rückzüge zu erledigen.

### Der rechtliche Werdegang des Projekts

Die *technischen Plangenehmigungen* nach Massgabe der Wasserrechtsgesetzgebung wurden ohne nennenswerte Schwierigkeiten erteilt. Offen ist die Bewilligung einer Dotierwassergruppe zur Nutzung der erhöhten Restwassermenge, welche mit der Klärung der Entschädigungsfrage in Zusammenhang steht.

Im *baupolizeilichen Bewilligungsverfahren* war namentlich zu beachten, dass der Kanton Bern sich am 6. Juni 1982 ein Gesetz über die See- und Flussufer gegeben hatte, welches dort bauliche Anlagen besonderen Restriktionen unterstellt [9]. Das Bauvorhaben beschlug eine Bauverbotszone nach diesem Erlass. Die gebotene Interessenabwägung ergab indessen, dass das Projekt den Zielsetzungen der Ufererhaltung nicht widersprach, wobei entscheidendes Gewicht dem Sanierungszweck zukam. Die Hauptbaubewilligung wurde trotzdem mit insgesamt drei Beschwerden angefochten, welche jedoch in der Folge gütlich bereinigt werden konnten.

Die abwasserbezogene *Gewässerschutzbewilligung* erging oppositionslos.

*Forstpolizeilich* waren eine Rodung von 100 m<sup>2</sup> Wald und die Unterschreitung des gesetzlichen Waldabstandes zu bewilligen. Die kantonale Bewilligungsbehörde hielt dafür, dass einerseits die Sanierung des Kraftwerks eine Notwendigkeit darstelle, andererseits die zu rodende Waldfläche angesichts ihrer geringen räumlichen Ausdehnung und der Bestockung mit Hasel- und Holunderbüschen sowie kleinen Ulmen nur eine geringe Nutz-, Schutz- und Wohlfahrtswirkung entfalte und entsprechend dem Mitbericht des Naturschutzinspektorats nicht als besonders geschützte Ufervegetation erscheine [10]. Auch hier gab die Interessenabwägung letztlich den Ausschlag zugunsten des Projekts. Die gegen die Rodungsbewilligung eingelegten vier Beschwerden konnten gütlich bereinigt werden.

Hauptdiskussion bot die *fischereipolizeiliche* Bewilligung. Die zuständige Behörde qualifizierte das Projekt als Neuanlage im Sinne von Art. 24 Abs. 3 FG [5] und verfügte seine umfassende Prüfung unter fischereibiologischen Gesichtspunkten. Nach Eingang eines umfangreichen Gutachtens bewilligte sie das Projekt schliesslich unter zusätzlichen Auflagen, wobei die Erhöhung der Dotierwassermenge auf 12 m<sup>3</sup>/s bei Nutzwassermengen von 25 m<sup>3</sup>/s oder mehr beziehungsweise von 10 m<sup>3</sup>/s bei tieferen Nutzwassermengen als einschneidendste im Vordergrund stand. Im Interesse der auch ihr wichtigen Anliegen des Fischbestandes und der Fischerei erklärte die Einwohnergemeinde Bern sich bereit, diese neuen Auflagen zu akzeptieren, womit der Weg frei wurde, sich mit den Opponenten zu einigen und langwierige Rechtsstreitigkeiten im Bewilligungsverfahren zu vermeiden.

### Ausblick

Trotz der unerwarteten Verzögerungen und der langwierigen und zum Teil aufreibenden Auseinandersetzungen mit seinen Gegnern konnte das Vorhaben in rechtlicher Hinsicht letztlich zu einem positiven Abschluss gebracht werden. Zur Diskussion steht heute noch die Frage, ob der Kanton Bern der Konzessionärin aus der Erhöhung der Dotierwassermenge und damit der Schmälierung der verliehenen Nutzungsrechte Schadenersatz zu leisten hat. Die Verhandlungen darüber wurden aufgenommen und sollen nach Eingang eines gemeinsam in Auftrag gegebenen Rechtsgutachtens fortgesetzt werden. Das Ergebnis der Auseinandersetzung wird ohne Zweifel von grundsätzlicher Bedeutung für vergleichbare Eingriffe in bestehende Konzessionen sein.

[1] Bundesgesetz über die Raumplanung (RPG) vom 22. Juni 1979, Systematische Sammlung des Bundesrechts (SR) 700

[2] Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG) vom 7. Oktober 1983, SR 814.01

[3] Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer gegen Verunreinigung (GSchG) vom 8. Oktober 1971, SR 814.20

[4] Bundesgesetz betreffend die eidgenössische Oberaufsicht über die Forstpolizei (FPolG) vom 11. Oktober 1902, SR 921.0

[5] Bundesgesetz über die Fischerei (FG) vom 14. Dezember 1973, SR 923.0

[6] Art. 22 und 23 des Bundesgesetzes über die Nutzbarmachung der Wasserkräfte (WRG) vom 22. Dezember 1916, SR 721.80

[7] Art. 23 des bernischen Gesetzes über die Nutzung des Wassers (WNG) vom 3. Dezember 1950, Bernische Systematische Gesetzessammlung (BSG) 752.41

[8] Art. 43 WRG

[9] Gesetz über See- und Flussufer (GSF) vom 6. Juni 1982, BSG 704.1

[10] Art. 21 des Bundesgesetzes über den Natur- und Heimatschutz (NHG) vom 1. Juli 1966, SR 451

Adresse des Verfassers: Hans Peter Walter, Fürsprecher, Bundesrichter, Kistlerweg 32, CH-3006 Bern.

## 4. Energiewirtschaftliche Bedeutung

Jürg Vaterlaus

### Zusammenfassung

Die technischen Anwendungen des physikalischen Phänomens «Elektrizität» führten 1891 in der Stadt Bern erstmals dazu, die Primärenergie Wasserkraft für die Elektrizitätsproduktion einzusetzen. Begünstigt durch den raschen Verbrauchsanstieg, konnte 1909 das Kraftwerk Felsenau in Betrieb genommen werden. Seine frühere Rolle als Hauptversorger der Stadt Bern mit elektrischer Energie wird es auch nach dem Umbau nicht mehr annähernd erreichen.

### Résumé: Economie énergétique

Pour la première fois en 1891, les applications techniques du phénomène «Electricité» ont mené à l'utilisation de la force hydraulique pour la production d'énergie électrique. Favorisée par la forte augmentation de la consommation, la centrale hydraulique de la Felsenau a pu être mise en service en 1909. Même après sa transformation, elle ne va plus pouvoir jouer son ancien rôle de producteur principal d'énergie électrique pour la ville de Berne.

### Summary: The production of electricity

For the first time in 1891 the technical applications of the physical phenomenon "Electricity" led to the utilization of water-power to produce electrical energy in the town of Berne. Favoured by the quick increase of consumption, the power-station of Felsenau took up its service in 1909. Even after its transformation it will no more play the part of main-producer of energy for the town of Berne.

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts begannen die technischen Anwendungen des physikalischen Phänomens Elektrizität. Noch wusste man über die verschiedenen Erscheinungsformen des neuen Phänomens nicht exakt Bescheid, was aber nicht daran hinderte, in rascher Folge die Elektrizität für die Übermittlung (Telegrafie), die Beleuchtung (Kohlefadenlampe) und die Kraft (Elektromotor) zu nutzen.

Die seit dem Mittelalter genutzte Primärenergie Wasserkraft wurde in der Stadt Bern 1891 zum ersten Mal in der Matte für die Elektrizitätsproduktion eingesetzt. Diese erste Produktion diente der Beleuchtung und einfachen motorischen Anwendungen. Bereits kurze Zeit später wurde der produzierte Strom auch für die Strassenbahn eingesetzt. Der Verbrauch an elektrischer Energie stieg derart rasch, dass die Möglichkeit der Nutzung der durch Bern fliessenden Aare für die Elektrizitätserzeugung schnell in den Vordergrund trat. Nachteilig wirkte sich aus, dass sowohl in der Felsenau wie in der Matte das Gefälle der Aare schon lange für die Kraftproduktion über Wasserräder genutzt wurde und entsprechende Konzessionen bestanden.

Als Ausweglösung wurde ein Kraftwerk bei Wohlen studiert; Vergleiche zeigten, dass die Nutzung des Gefälles der grossen Aareschleife Berns viele Vorteile brachte. Mit einem kurzen Stollen konnte das Gefälle einer Flussstrecke von 9,6 km genutzt werden. Ferner durfte mit einer Produktion gerechnet werden, die eine Bedarfsdeckung über längere Zeit versprach. Hinderlich waren das bestehende Wasserrückzugsrecht der Spinnerei Felsenau wie auch vertragliche Vereinbarungen der Stadt Bern mit den Kanderwerken aus dem Jahre 1897. Vorerst beschloss man, den Spitzenbedarf mit einem Dampfkraftwerk (1200 PS) im Zentrum von Bern zu decken und über die rechtlichen Aspekte eines Wasserkraftwerks in der Felsenau weiter zu verhandeln. Dabei galt es, abzuwägen zwischen einem Ausbau der Kanderwerke, dem Wohlen- bzw. dem Felsenau-Kraftwerk. Dank einer vertraglichen Lösung mit der Spinnerei konnten 1906 deren Rechte gegen die Zusicherung, 800 kW während der Fabrikzeiten kostenlos zur Verfügung zu stellen, übernommen werden. Damit war der Weg frei, vom Kanton eine Konzession zu erwerben.

Vorsichtige Stimmen befürworteten eine Kraftwerkleistung von 4000 PS (2944 kW), da die Spitzenbelastung 1906 erst die Grenze von 2000 kW überschritten hatte. Zudem bestand noch, wie bereits erwähnt, die Möglichkeit der Dampfkraftnutzung durch Gas oder Kohle. Ende 1906 umfasste die Produktion des Elektrizitäts- und Wasserwerks der Stadt Bern die folgenden Anlagen:

Elektrizitätswerk Matte (3 Turbinen)	190 kW
Dampfzentrale (2 Dampfturbinen)	970 kW
UW Monbijou (2 Gasmotoren)	290 kW
Vertrag Kanderwerke	736 kW
<b>Total installierte Leistung</b>	<b>2186 kW</b>

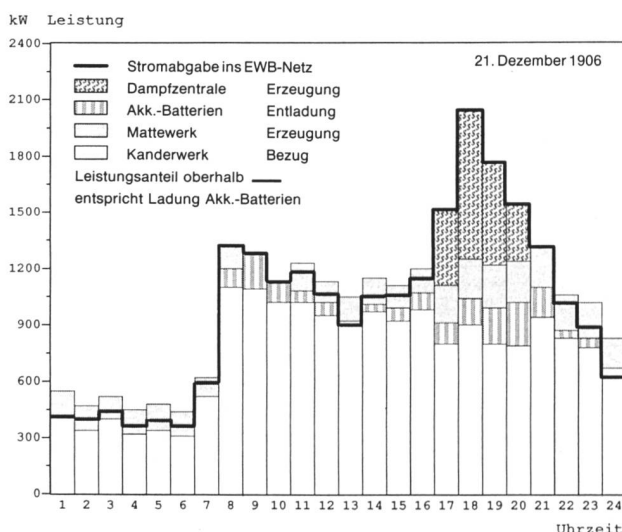


Bild 4–1. Leistungsdiagramm Elektrizitätswerk der Stadt Bern vom 21. Dezember 1906 vor Betriebsaufnahme des Kraftwerks Felsenau.

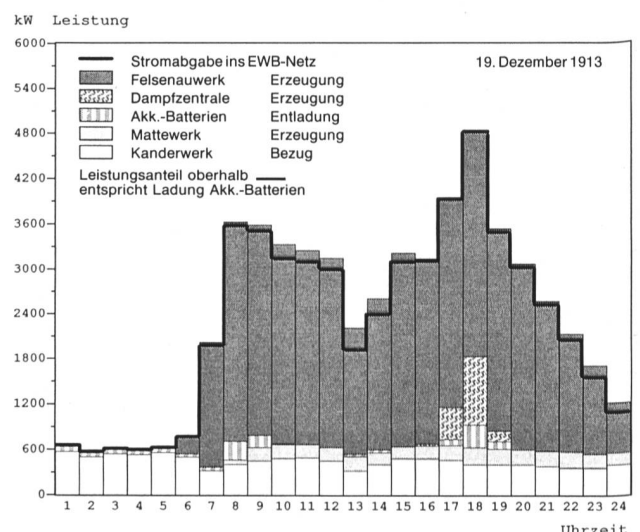


Bild 4–2. Leistungsdiagramm Elektrizitätswerk der Stadt Bern vom 19. Dezember 1913 nach Betriebsaufnahme des Kraftwerks Felsenau.

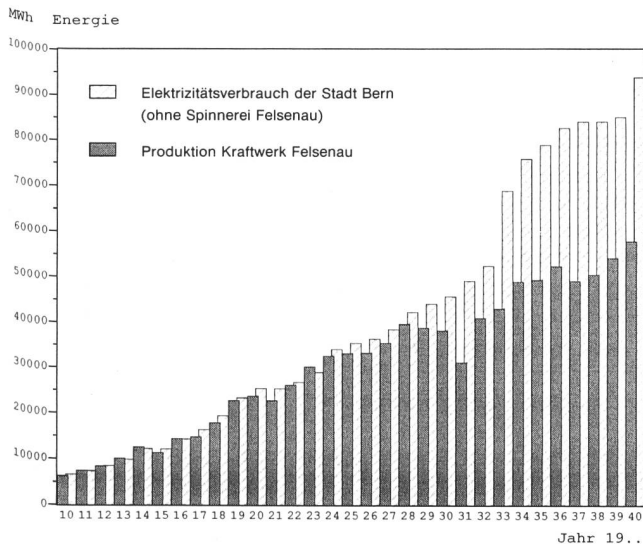


Bild 4–3. Elektrizitätsverbrauch der Stadt Bern und Produktion des Kraftwerks Felsenau 1910 bis 1940.

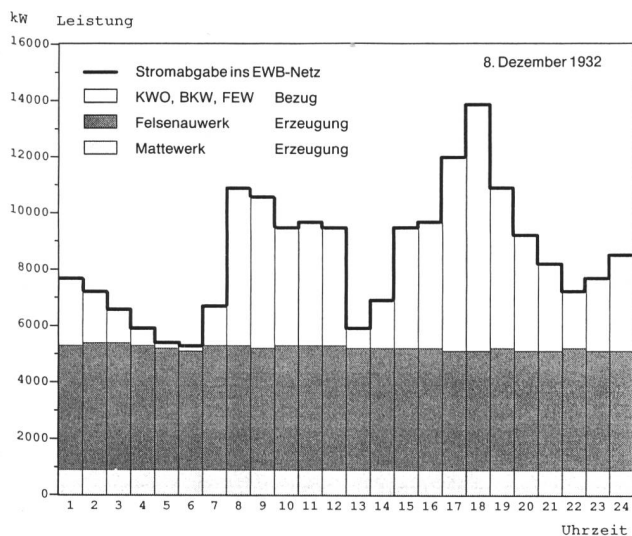


Bild 4–4. Leistungsdiagramm Elektrizitätswerk der Stadt Bern vom 8. Dezember 1932; das Kraftwerk Felsenau dient als Grundlastwerk.

Das Leistungsdiagramm vom 21. Dezember 1906 (Bild 4–1) zeigt, wie die Produktionsanlagen eingesetzt wurden. Man entschloss sich, das neue Werk für eine Wassernutzung von  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  auszulegen, aber vorerst nur drei Maschinen mit einer Gesamtleistung von 2600 kW einzubauen.

Im November 1909 produzierten die Generatoren im neu erstellten Kraftwerk Felsenau erstmals Strom für das Netz der Stadt Bern. Seit dem Beschluss, eine Konzession einzureichen, waren 25 Monate verflossen. Die Bauzeit betrug zwei Jahre. Die kurze Realisierungszeit war möglich, weil die Regierung eine provisorische Baubewilligung gewährte. Hatten die damals üblichen Stromunterbrüche in der Zuleitung der Kanderwerke und die damit verbundenen Stromausfälle die Entscheidung für ein Kraftwerk näher der Stadt wohl begünstigt?

Wie das neue Werk den Einsatz der bestehenden Produktionsanlagen veränderte, ist aus dem Leistungsdiagramm vom 19. Dezember 1913 ersichtlich (Bild 4–2).

Die Annahme, dass in den ersten Betriebsjahren oft Wasser ungenutzt über das Wehr gelassen werden musste, ist wohl erlaubt. Das erwähnte Leistungsdiagramm weist in den Stunden nach Mitternacht keine Produktion aus dem KW Felsenau aus.

Ein Vergleich der Gesamtproduktion des Kraftwerks Felsenau mit dem Gesamtverbrauch der Stadt Bern (Bild 4–3) zeigt in den Jahren nach der Inbetriebnahme bis etwa 1932 einen nahezu identischen Verlauf, wobei jeweils die Verluste nicht berücksichtigt sind. Ferner bestand damals ein ausgeprägtes Leistungs- und Regulierproblem, das mit Hilfe eines Reservevertrages und durch den Einsatz kleiner fossil betriebener Anlagen und Gleichstrombatterien als Pufferbatterien gelöst wurde. Diese konnten während drei Stunden bis zu 400 kW Leistung abgeben, wobei die teilweise notwendige zweimalige Umwandlung Wechselstrom – Gleichstrom – Wechselstrom über 25% Verluste brachte. Das Leistungsdiagramm vom 8. Dezember 1932 (Bild 4–4) zeigt die Produktion aus dem Kraftwerk Felsenau erstmals als Bandenergieproduktion und die Regulierleistung aus einem Speicherwerk. Offensichtlich hat man in der Periode 1910 bis 1932 den zusätzlichen Bedarf an elektrischer Energie vorwiegend aus der Wasserkraftnutzung der Aare gedeckt. Diese Aussage wird noch erhärtet durch folgende Aufstellung:

- 1909 Betriebsaufnahme von 3 Turbinen-Generatorgruppen mit einer Gesamtleistung von 2600 kW  
Nutzwassermenge  $50 \text{ m}^3/\text{s}$
- 1918 Betriebsaufnahme von 2 weiteren Turbinen-Generatorgruppen, Gesamtleistung bei Minimalgefälle 5400 kW  
Nutzwassermenge  $80 \text{ m}^3/\text{s}$
- 1925 Optimieren der Gefälldifferenz; die Gesamtleistung beträgt bei Maximalgefälle 7800 kW

Durch zusätzliche Beteiligungen an Hochdruckkraftwerken (Oberhasli, Maggia, Blenio, Sanetsch) wurde das Kraftwerk Felsenau immer mehr mit dem Ziel betrieben, das Aarewasser möglichst vollständig auszunutzen bzw. nur die vorgeschriebene Restwassermenge von  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  einzuhalten. Fortan floss in den Flusswindungen zwischen dem Stauwehr Engehalde und dem Maschinenhaus nur dann mehr als die Restwassermenge, wenn die Abflussmenge der Aare  $84 \text{ m}^3/\text{s}$  überstieg, was vorwiegend in den Sommermonaten Juni, Juli und August der Fall war. Bei Hochwasser führt die Aare in Bern mehr als  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ , wobei die Restwasserstrecke mit mehr als  $320 \text{ m}^3/\text{s}$  durchflossen wird. Das Überfallwasser am Stauwehr verleitet fälschlicherweise oft zur Annahme, man hätte überschüssige elektrische Energie, dabei wird sinnvollerweise ein Flusskraftwerk nicht auf Hochwassersituationen ausgerichtet. Wasserkraftanlagen sind kapitalintensive Bauwerke. Es ist wirtschaftlich nicht sinnvoll, für einen Betrieb von einigen wenigen Wochen die Ausbaumassermenge im Vergleich zur Wasserführung eines Flusses extrem hoch anzusetzen. Zusätzlich zeigen neue ökologische Untersuchungen in Restwasserstrecken, dass eine schwankende Restwassermenge dem natürlichen Zustand einer solchen Strecke näher kommt als eine über Monate konstante Wasserführung.

Für die theoretische Bruttoerzeugung der möglichen Energiegewinnung aus dem Aarewasser auf dem Gemeindegebiet der Stadt Bern im Vergleich zur heutigen Nutzung wurden folgende idealisierte Randbedingungen angenommen:

- Vollständige Nutzung der Wassermenge und Gefälldifferenz.
- Wassermenge der Aare entspricht dem 10jährigen Mittelwert der Periode 1975 bis 1984.
- Natürliche Niederschläge im Zwischeneinzugsgebiet werden mit der halben Gefälldifferenz verwertet.

Vergleicht man die theoretische Bruttoerzeugung mit der mittleren Erzeugung in den beiden Aarekraftwerken Matte

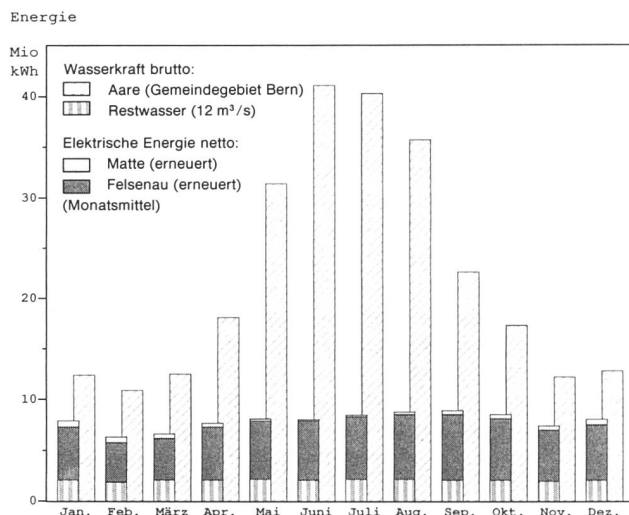


Bild 4–5. Maximal mögliche Energiegewinnung aus dem Aarewasser auf dem Gemeindegebiet der Stadt Bern im Vergleich zur heutigen Nutzung in den Kraftwerken Matte und Felsenau (gemittelte Monatswerte).

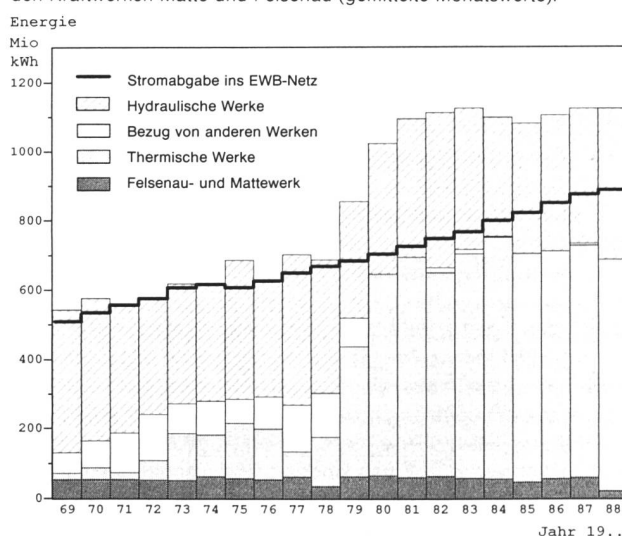


Bild 4–6. Entwicklung des Jahresenergieumsatzes 1969 bis 1988; Elektrizitätswerk der Stadt Bern (EWB).

und Felsenau, ist ersichtlich, dass in den Monaten mit Niederwasser das Energiepotential für die Elektrizitätsproduktion der Aare zu mehr als zur Hälfte genutzt wird. Wie bereits erwähnt, ist diese Periode auch in der Natur gut erkennbar an der minimalen Wasserführung im genutzten Aarebereich (Bild 4–5).

Bei Angabe der jeweiligen Maximal- und Minimalwerte der Wasserführung ergäbe sich ein Produktionsband von –30 % bis +40 % des langjährigen Mittels. Für eine Nutzung der maximal möglichen Produktion müsste ein Kraftwerk gebaut werden, dessen Schluckvermögen 5mal grösser wäre, als dies heute der Fall ist. Dabei müsste in Kauf genommen werden, dass dieses Kraftwerk in zehn Jahren nur einmal für kurze Zeit in Vollbetrieb stehen würde. Zudem würde immer eine konstante Wassermenge von 12 m³/s die Aareschleife durchfließen. Dies wäre wohl ökologisch wie auch wirtschaftlich nicht zu verantworten. Das neue Kraftwerk Felsenau dürfte eine gute Kompromisslösung darstellen.

Die minimale Wasserführung in der Aareschleife wurde in einem fischereibiologischen Gutachten [1] untersucht. Der Gutachter fordert eine Mindestwassermenge von 12 m³/s anstelle der in der Konzession festgeschriebenen 4 m³/s. Wie in Kapitel 3 beschrieben, muss neu, gestützt auf das

Gutachten, die Restwassermenge generell 12 m³/s betragen. Diese Erhöhung führt zu einer jährlichen Minderproduktion von etwa 4,5 Mio kWh. Eine bessere Nutzung der Aare, was gleichbedeutend wäre mit einer erhöhten Ausbaumwassermenge, hätte zu einer Konzessionsänderung geführt und stand bis heute als Kompensation nicht zur Diskussion. Dank gezielten Verbesserungen sowohl an der mechanischen Anlage wie auch an der Wasserführung kann dennoch erwartet werden, dass das neue Kraftwerk Felsenau etwas mehr elektrische Energie produzieren wird als das alte. Trotzdem wird es seine frühere Rolle als Hauptversorger der Stadt Bern mit elektrischer Energie nicht mehr annähernd erreichen (Bild 4–6).

[1] Fischereibiologisches Gutachten zur Frage der erforderlichen Restwasserführung der Aare. Von Heinz Marrer, lic. phil. nat., Büro für Gewässer- und Fischereifragen, Solothurn, vom 16.9.1985.

Adresse des Verfassers: Jürg Vaterlaus, Direktor des Elektrizitätswerks der Stadt Bern, Sulgeneckstrasse 18, CH-3001 Bern.



**Kraftwerk Felsenau 1989**  
**Elektrizitätswerk der Stadt Bern**

## 5. Das Erneuerungsprojekt

Werner Müller und Urs Stoller

### Zusammenfassung

Die Wahl der hydraulischen Maschine, die Disposition der neuen Zentrale sowie die Regulierung werden beschrieben. Über die hydrologischen Verhältnisse und über die Energieproduktion sind die wichtigsten Daten zusammengefasst. Die Bauzeit betrug rund 33 Monate. Die Anlagekosten belaufen sich auf rund 38 Mio Franken.

### Résumé: Le projet de renouvellement

Le choix du type de la machine hydraulique, la disposition de la centrale et la régulation sont décrits. Les dates de la situation hydrologique et la production d'énergie sont résumées. Le temps de construction s'est élevé à environ 33 mois et les investissements ont été de l'ordre de 38 millions de francs.

### Summary: The refurbishment project

The choice of the hydraulic machine, the disposition of the new power-station and the regulation are described. The facts about the hydraulic situation and the production of energy are summed up. The time of construction ran up to about 33 months and the costs of the installation amounted approximately to 38 million francs.

### Einleitung

Das Kraftwerk Felsenau besteht aus der Wasserfassung und Wehranlage Engehalde, dem Druckstollen und der Kraftwerkzentrale Felsenau (Bild 5–1, Übersichtsplan). Im Jahre 1975 wurde im Auftrag des Elektrizitätswerks der Stadt Bern ein generelles Projekt für die Modernisierung der gesamten Kraftwerkanlage ausgearbeitet. Die Realisierung erfolgte in zwei Etappen:

- 1977–1980 Umbau der Wasserfassung und der Wehranlage Engehalde sowie die Sanierung des Druckstollens
- 1986–1989 Um- bzw. Neubau der Kraftwerkzentrale Felsenau

Der Um- bzw. Neubau der Kraftwerkzentrale bestand im wesentlichen aus dem Ersatz der bestehenden fünf alten Maschinen und der dadurch notwendigen baulichen Anlageteile.

## Hydrologie, Energieproduktion

Die konziidierte Wassermenge beträgt  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ . Diese Wassermenge wird im Mitteljahr an 204 Tagen erreicht. Die mittlere Wasserführung der Aare in Bern beträgt rund  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  (Bild 5–2).

Eine Erhöhung der Ausbauwassermenge ( $Q_A$ ) wurde abgeklärt. Sie kann bis auf  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  gesteigert werden, ohne dass die Fassung und der Druckstollen vergrößert werden müssten. Eine weitere Erhöhung stand nicht zur Diskussion. Der Kanton Bern verlangte eine Erhöhung der konziidierten Restwassermenge von  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  in der Ausleitungsstrecke. Entsprechende fischereibiologische Expertisen wurden während der Projektierungsphase durch den Bauherrn in die Wege geleitet. Die kantonalen Behörden erhöhten in der Folge die Restwassermenge auf  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ . Damit reduziert sich die Anzahl der Volllasttage. Bei  $Q_A = 80 \text{ m}^3$  kann im Mitteljahr an 188 Tagen mit Vollast gefahren werden, bei  $Q_A = 100 \text{ m}^3$  an 160 Tagen.

Die Auswirkung der vergrößerten Restwassermenge auf die Energieproduktion geht aus Tabelle 1 hervor.

Tabelle 5–1. Die Auswirkung der neuen Restwassermenge auf die Energieproduktion im Mitteljahr verglichen mit der heutigen Produktion.

Restwassermenge	$Q_A = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ altes Kraftwerk	$Q_A = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ neues Kraftwerk	$Q_A = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ Ausbauvariante
$4 \text{ m}^3/\text{s}$	61 Mio kWh	67,1 Mio kWh	76 Mio kWh
$12 \text{ m}^3/\text{s}$	–	62,9 Mio kWh	71,1 Mio kWh

42 bis 46% der Energie werden in den Wintermonaten erzeugt. Eine Steigerung der Energieproduktion konnte durch bessere Wirkungsgrade der hydraulischen Maschine erreicht werden.

Der Einbau einer Dotierwassergruppe bei der Wehranlage Engehalde zur Nutzung der Restwassermenge von  $12 \text{ m}^3/\text{s}$  würde eine Nettomehrproduktion von rund 2 Mio kWh bringen. Diesbezügliche Abklärungen sind im Gange.

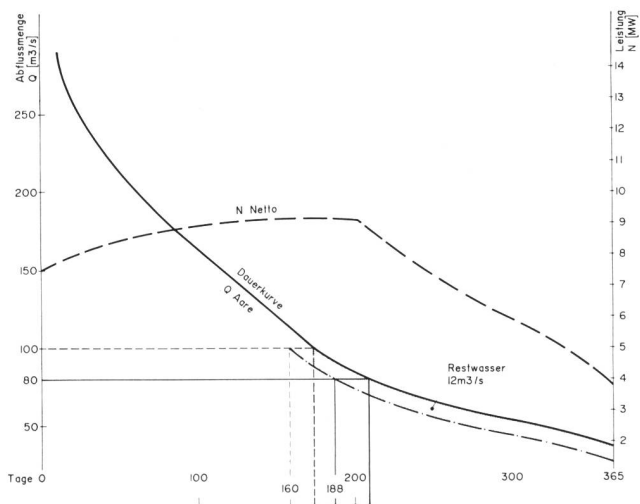


Bild 5–2. Dauercurve der Aare-Wassermengen mit Betriebs- bzw. Restwassermengen. Dauercurve der Nettoleistung.

## Evaluation der Turbine und Zentralendisposition

Für die projektierte Ausbauwassermenge von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw.  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  und das vorhandene Nettogefälle von 11 bis 14 m zog man nur Kaplan- bzw. Rohrturbinen in Betracht. Für folgende Varianten wurden Vergleichsstudien durchgeführt:

- 1 oder 2 vertikalachsige Kaplanurbinen
- 1 oder 2 Rohrturbinen
- 2 S-Turbinen mit aussenliegendem Generator.

Eine Kosten-/Nutzen-Analyse hat ergeben, dass für den Betrieb eine Turbine genügt. Der Anteil der produzierten Leistung am Gesamtverbrauch der Stadt Bern ist zu klein, um aus Betriebssicherheitsgründen eine Aufteilung zu erwägen. Zwei kleinere Einheiten weisen zudem an der Leistungsschnittstelle einen schlechteren Wirkungsgrad auf. Ausschlaggebend für die Wahl einer Rohrturbine waren die Baukosten, die bei einer vertikalachsigen Kaplanurbine durch die notwendige grössere Raumhöhe höher ausgefallen wären.

Bei der Disposition der Zentrale mit der neuen Rohrturbine standen bei allen Varianten

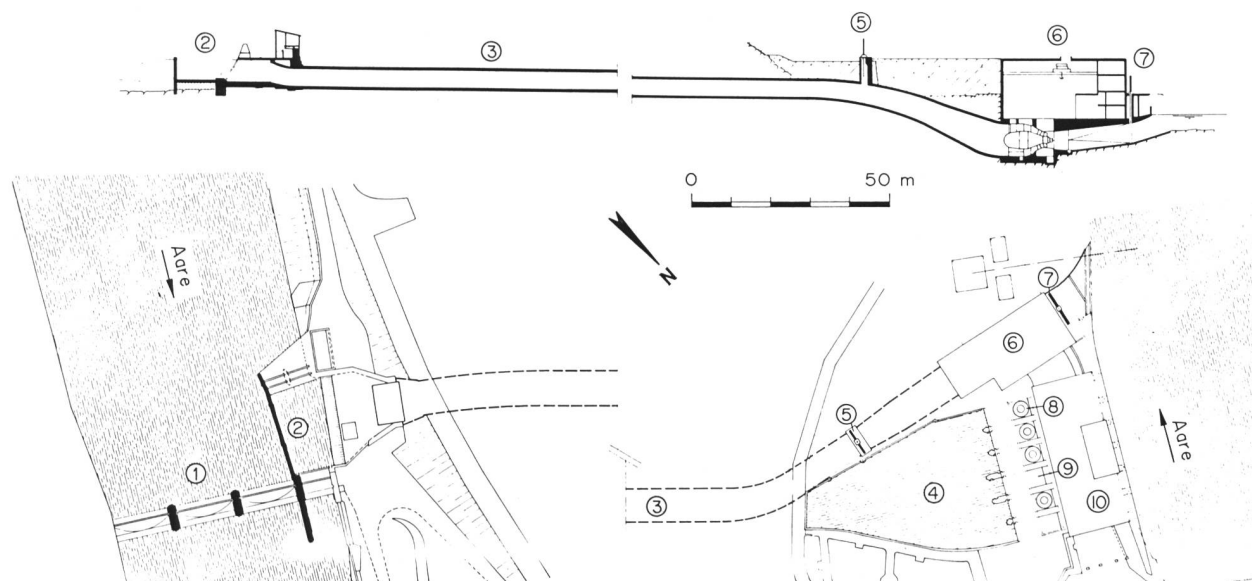


Bild 5-1. Längsschnitt durch die Anlage Felsenau oben. Unten links Grundriss Wehr und Wasserfassung, rechts Zentrale Felsenau. 1 Wehr, 2 Wasserfassung, 3 Druckstollen, 4 Vorbecken, 5 Einlaufschütz, 6 neue Maschinenhalle, 7 Auslaufschütz, 8 Überfallschächte, 9 Schwallentlastung: Klappe und Segmentschütz, 10 alte Maschinenhalle.

- die Beibehaltung des bestehenden Druckstollens und der Fassung,
- die Beibehaltung des bestehenden Vorbeckens mit einer rund 1200 m<sup>2</sup> grossen Wasseroberfläche als Wasserschloss sowie
- die möglichst lange Aufrechterhaltung des Kraftwerkbetriebes mit der alten Zentrale während der Bauarbeiten als Randbedingungen fest.

Nach einer ersten Ausscheidung standen noch zwei Varianten zur Diskussion:

- Einbau der Turbine in der alten Zentrale am Platz von zwei der bestehenden fünf Turbinen.
- Neue Zentrale in der alten Schwallentlastungsrinne neben dem bestehenden Vorbecken.

Die Wahl, eine neue Zentrale zu bauen, wurde entscheidend geprägt durch die Möglichkeit der Aufrechterhaltung der Energieproduktion während zwei von insgesamt drei Jahren Bauzeit sowie das Risiko, dass beim Bauen in der bestehenden, vollständig aus Stampfbeton erstellten Zentrale schwierige Bedingungen mit entsprechender Kostenfolge auftreten könnten.

Die Realisierung einer neuen Zentrale verlangte, dass vor Baubeginn eine neue Schwallentlastung in Betrieb genommen werden musste. Ferner war eine Baugrube auszuheben, deren Sohlentiefe von 24 m unterhalb des in Betrieb stehenden Vorbeckenwasserspiegels lag, was einen entsprechend vorsichtigen Bauvorgang erforderte (Kapitel 6).

## Gesamtdisposition

Die Höhe der neuen Zentrale war mit der unteren Begrenzung durch die hydraulisch günstigste Lage der Turbine (Kapitel 8) und der oberen durch die Lage des Flachdachs der bestehenden Zentrale gegeben. Die Breite resultiert aus dem Laufraddurchmesser und dem gewählten Bauvorgang. Die hydraulische Verbindung oberwasserseitig erfolgt durch einen neuen S-förmigen Zulaufstollen und unterwasserseitig durch ein trompetenförmiges Saugrohr. Der Zulaufstollen ist über eine neu gestaltete Verbindung mit dem Vorbecken verbunden. Für die ober- und unterwasserseitigen Revisionsabschlüsse wurden hydraulisch gesteuerte Tafelschützen gewählt, die zusammen mit zwei grossen festinstallierten Entleerungspumpen im Turbinenschacht eine rasche Entleerung der Turbine ermöglichen.

Turbine und Generator (Kapitel 8) sind über entsprechende Schächte, die abgedeckt werden, vom Maschinensaal aus getrennt zugänglich.

Im gleichen Gebäude sind ferner der Transformator (13 MVA 5,25/11,5 kV), die Batterieanlagen mit Gleich- und Wechselrichter, die Garderobe, der Sanitärtrakt und der Kommandoraum untergebracht.

Im Zwischentrakt befinden sich neben der Wärmeversorgungsanlage (Kapitel 9) der Aufenthaltsraum und das Betriebsleiterbüro. Die bestehende Zentrale beherbergt die 10-kVA-Schaltanlage sowie diverse Nebenräume mit Transformator für Eigenbedarf und Hilfsbetriebe. Eine alte Maschinengruppe, Generator und Turbine, wurde am angestammten Platz als Museumsstück belassen.

## Wasserzufluss und Regulierung

Im normalen Betriebsfall wird das Nutzwasser von der Fassung Engehalde durch den Druckstollen und den neuen Zulaufstollen der Turbine zugeleitet. Im Störfall fliesst das genutzte Wasser oberhalb des Oberwasserschützes ins Vorbecken und von da über die Schwallentlastungsanlage (Kapitel 7) in die Aare zurück.

Bis zur Ausbauwassermenge der Turbine wird das Niveau

der Aare oberhalb der Wehranlage durch die Turbine reguliert, nach Erreichung des Schluckvermögens durch die bestehende Regulieranlage des Stauwehrs.

Der Wasserspiegel im Vorbecken wird durch die Entlastungsorgane reguliert, wobei beim Schnellschluss der Turbine der Grundablassschütz auf einen vorbestimmten Wert durch Auslösen eines Befehls geöffnet wird. Die Schwallklappe wird allein in Abhängigkeit der Wasserspiegellage im Vorbecken betätigt.

Wie weit sich der gewünschte Inselbetrieb mit dem 500 m langen oberwasserseitigen Druckstollen regulieren lässt, muss durch einen Versuch abgeklärt werden.

## Bauablauf, Montage Turbine und Generator

Nachdem der Baugrubenausbruch (Kapitel 6) in verschiedenen Etappen und der Abschluss der Baugrube gegen die Aare mit einem Fangedamm fertiggestellt waren, wurden zuerst die Turbinenkammer, das Saugrohr und der Laufradschacht betoniert und anschliessend die Maschinenhalle und der Betriebstrakt hochgezogen. Parallel dazu waren die Betonarbeiten für den Zulaufstollen in Ausführung. Die Wände des zwischen ca. 3 und 24 m unterhalb des Aare- resp. Vorbeckenwasserspiegels liegenden Laufradschachtes und der Maschinenhalle wurden in wasserdichtem Beton (mit den entsprechenden Massnahmen für die Betonnachbehandlung und Rissbreitenbeschränkung) ausgeführt. 23 Monate nach Baubeginn stellte die alte Zentrale ihren Betrieb ein. Folgende Arbeiten konnten anschliessend ausgeführt werden:

- Anschluss des neuen Zulaufstollens an den bestehenden.
- Umbau der alten Turbinenkammern zu Schwallentlastungsschächten.
- Demontieren des alten Trafos und Erstellen des Zwischentrakts.

Die Turbinenmontage begann 1½ Monate nach Ausserbetriebnahme der alten Zentrale.

Die bis zu 50 t schweren Einzelteile (z. B. der Leitapparat) wurden auf einer neu erstellten Schwerlastzufahrt über dem Vorbecken antransportiert und mit einem Pneukran durch eine Montageöffnung in der Maschinenhallendecke abgesenkt. Für Revisionen ist die Zufahrt durch die bestehende Zentrale direkt unter die Kranbahn gewährleistet. Turbine und Generator wurden mit Hilfe des Maschinenhallenkran montiert. Ihre Montage dauerte acht Monate.

33 Monate nach Baubeginn resp. 10 Monate nach Ausserbetriebnahme der alten Maschinen konnte der Probebetrieb mit der neuen Turbine aufgenommen werden.

## Anlagekosten

Die Anlagekosten für den Um- und Neubau der Kraftwerkanlage beziffern sich auf 38 Mio Franken (Preisbasis 1983). Hinzu kommen die Aufwendungen für den Umbau der Wehranlage und die Sanierung des Druckstollens, so dass mit Gesamtinvestitionen von rund 46 Mio Franken gerechnet werden muss.

Der Gestehungspreis für eine Kilowattstunde beläuft sich demnach auf 6,5 bis 7 Rappen.

Adresse der Verfasser: *Werner Müller*, Bauing. SIA, Stv. Direktor, und *Urs Stoller*, Bauing. HTL, Projektleiter, IUB Ingenieur-Unternehmung AG Bern, Thunstrasse 2, CH-3000 Bern 6.

## 6. Baugrube und Baugrubensicherung

Ueli Sennhauser und Urs Stoller

### Zusammenfassung

Für den Bau der neuen Zentrale Felsenau musste bei engen Platzverhältnissen eine tiefe Baugrube ausgehoben werden. Trotz einiger Unsicherheiten in der Stabilitätsberechnung der Baugrubenwände wurde auf eine systematische Spriessung verzichtet und dafür ein ausgedehntes Überwachungskonzept mit verschiedenen Messsystemen aufgezogen. Dadurch konnte viel Zeit und Geld gespart werden, ohne dass ein grösseres Risiko eingegangen wurde.

### Résumé: La fosse pour la centrale et sa surveillance

Pour la construction de la nouvelle centrale de Felsenau, une fosse profonde a dû être creusée dans des conditions de place très défavorables. Malgré quelques incertitudes dans les calculs de stabilité des parois de la fosse, on a renoncé à un étayage systématique. Par conséquent, un vaste concept de surveillance comprenant différents systèmes de mesure a dû être établi. De cette manière, beaucoup de temps et d'argent ont pu être économisés sans prendre de plus grands risques.

### Summary: Ditch to be excavated for the powerhouse and its safety

In view of the construction of the new power-station a deep ditch had to be excavated at very bad place circumstances. In spite of some uncertainties in the stability calculation of the ditch walls, we renounced on a systematic support. A large supervision concept with different measuring systems had been established. Thus a lot of money and much time have been economized without taking larger risks.

### Allgemeines

Für den Bau der neuen Zentrale musste eine Baugrube von 45 m Länge, 12 m Breite und einer Tiefe von bis zu 24 m ausgehoben werden (Bild 6–1). Die Arbeiten wurden stark

erschwert durch die äusserst knappen Platzverhältnisse, war man doch eingeeengt durch:

- die alte Zentrale (in dieser Bauphase noch in Betrieb stehend) mit einem Aussentransformator direkt an der Baugrubenkante,
- das volle Vorbecken, dessen Wasserspiegel 24 m über dem tiefsten Punkt der Baugrube lag,
- den Hochspannungsmast mit zwei Abgangsmasten,
- die 132-kV-Freileitung,
- die Aare, deren Wasserspiegel 14 m über dem tiefsten Punkt der Baugrube lag.

### Bauvorgang

Der Hanganschnitt im Lockergestein (Auffüllung) wurde mit einer 3 bis 5 m hohen, im Fels verankerten Rühlwand gesichert. Unterhalb des Lockermaterials lag die Baugrube bis zur Sohle in der Unteren Süsswassermolasse. Sie besteht aus einer Wechsellagerung von kompakten, unterschiedlich harten Sandsteinen und weichen Mergelschichten unterschiedlicher Mächtigkeit (cm bis einige dm). Der Fels wurde sprengfrei mit schwerem Montabert-Abbauhammer, der an einen Raupenbagger montiert war, abgebaut. Das Aushubmaterial wurde mit einem 1,5 m³ fassenden Schuttkasten vom Kran aus der Baugrube gehoben, in ein Umschlagsilo gekippt und von dort mit Lastwagen zur Deponie transportiert. Bei einer Tagesleistung von bis zu 220 m³ wurden insgesamt 9000 m³ Material abtransportiert. Zum Schutz vor Verwitterung und gegen lokale Instabilitäten wurden die Baugrubenwände systematisch mit 3 bis 6 m langen Mörtelankern, Armierungsnetzen und Gunit gesichert. Bei Wasserzutritten (meist oberhalb der Mergelschichten) deckte man die Wand vor dem Gunitieren mit Noppenfolie ab und leitete das gefasste Wasser zur Baugrubensohle. Den aareseitigen Baugrubenabschluss bildete ein 55 m langer Kastenfangedamm von 5 m Breite und 4 bis 6 m Höhe.

### Sicherheitskonzept für die hochspannungsführenden Teile

Der Turmdrehkran der Bauunternehmung (Ausladung 45 m) musste wegen des steil ansteigenden Aarehanges 65 m hoch aufgebaut werden; nur so konnte er frei im Wind drehen. Damit hatte er die Möglichkeit, über Hochspannungsmast und -leitung zu schwenken. Da es nicht möglich war, beide zum Mast führenden Leitungsstränge über längere Zeit ausser Betrieb zu nehmen, musste in Zusammenarbeit mit Bauunternehmung, Bauleitung, Elektrizitätswerk der Stadt Bern und Suva ein Sicherheitskonzept gefunden werden. Dieses umfasste folgende Punkte:

- Der Einbau einer mechanischen Schwenkbegrenzung, die das Drehen des Krans über den Mast und die Hochspannungsleitungen verunmöglichte.
- Das Ausschalten und Erden des baugrubenseitigen Leitungsstranges während der Arbeitszeit. Dieser diente als «Schutzgerüst» für den hinteren stromführenden Strang. Während der Nacht musste aus Gründen der Versorgungssicherheit auch der baugrubenseitige Leitungsstrang jederzeit in Betrieb genommen werden können. Ein Angestellter des Elektrizitätswerks entfernte deshalb jeden Abend die Erdung bei den Abgangsmasten, gleichzeitig sperrte er die Stromzufuhr des Baukrans mit einem Schlüsselschalter. Am Morgen vor Arbeitsbeginn der Unternehmung erfolgte das gleiche Prozedere mit Erden der Leitungen und Freigabe der Stromzufuhr des Krans.

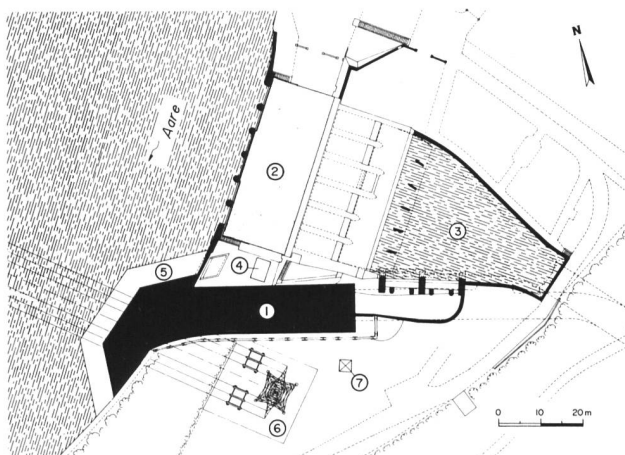


Bild 6–1. Situation der Baugrube.

1 Baugrube, 2 alte Zentrale, 3 Vorbecken, 4 Aussentrafo, 5 Fangedamm, 6 Hochspannungsmast, 7 Baukran.

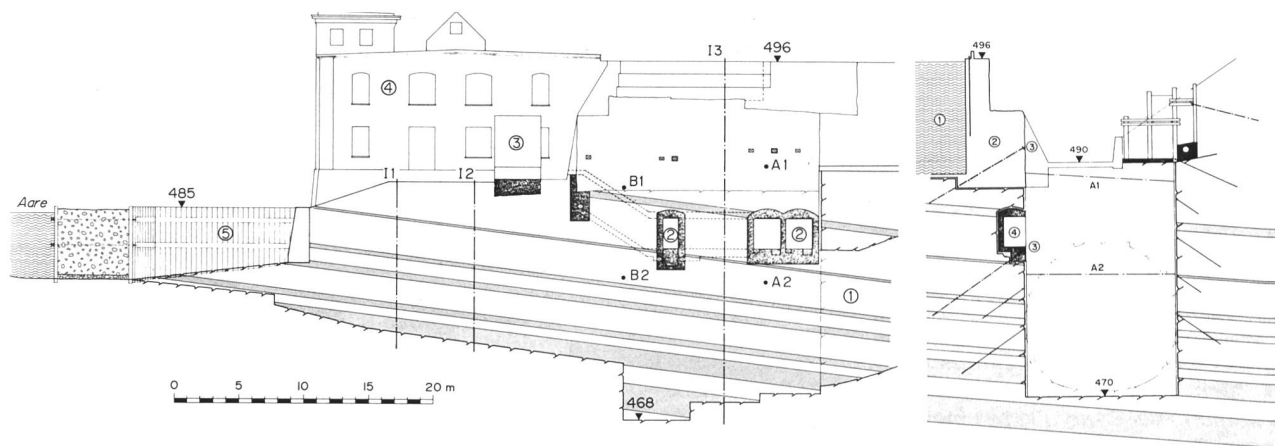


Bild 6-2. Längsschnitt durch die Baugrube.  
1 Zulaufstollen, 2 Kabelgang, 3 Aussentrafo, 4 alte Zentrale, 5 Fangedamm, I1 I2 I3: Inklinometerbohrungen, A1 A2 B1 B2: Messquerschnitte der Distometermessungen.

Bild 6-3. Querschnitt durch die Baugrube.  
1 Vorbecken, 2 Vorbeckenmauer, 3 100-t-Anker, 4 Kabelgang, A1 A2: Messstrecken der Distometermessungen.

## Stabilität der Baugrube

Die Geologen prognostizierten für die Baugrube eine Wechsellagerung aus Sandstein und Mergel mit einem generellen Schichteinfallen von 5 bis 10° in südlicher Richtung. Tonige Mergellagen oder steilstehende Klüfte als potentielle Gleitflächen wurden keine beobachtet, konnten aber nicht völlig ausgeschlossen werden.

Für die Stabilitätsberechnung wählte man das Modell des Abgleitens auf einer Ebene. Es basiert auf der Annahme einer durchgehenden, steilstehenden Kluft parallel zur Baugrube, in der sich der ganze Wasserdruck des Vorbeckens aufbaut. Eine Sensitivitätsanalyse für verschiedene Gleitschichtneigungen, Reibungswinkel und Auftriebsanteile ergab, je nach Kombination der Annahmen, rechnerische Sicherheiten zwischen 0,9 und 1,6. Schon die Bandbreite dieser Resultate deutet darauf hin, mit welchen Unsicherheiten die Berechnung behaftet war. Dazu musste noch die Unsicherheit der Modellbildung in Betracht gezogen werden. Um für jede Kombination eine genügend grosse Sicherheit zu gewährleisten, hätte in der Baugrube eine massive Spriessung eingebaut werden müssen. Der Bauablauf wäre dadurch stark behindert worden, was eine wesentlich längere Bauzeit und höhere Kosten zur Folge gehabt hätte. Es wurde deshalb auf eine systematische Spriessung verzichtet und dafür folgendes Sicherheitskonzept angewendet:

- Die Parameter der Berechnung (vor allem Schichtneigung und Klüftigkeit) wurden laufend vor Ort überprüft (Bilder 6-1 und 6-2).
- Mit ausgedehnten Messungen wurden die Bewegungen der Baugrubenwände überwacht und ausgewertet.
- Es wurde vorgesehen, erst beim Auftreten aussergewöhnlicher Verformungen lokal eine Spriessung einzubauen.
- Vorbeckenmauer und Kabelgang wurden aufgrund der Stabilitätsberechnung mit 100-t-Felsanker gesichert und die Ankerkräfte mit Druckmessdosen überwacht.

## Messkonzept

In einer ersten Phase wurden periodisch folgende Messungen ausgeführt:

- Tachymetrische Vermessung der Rühlwandkrone und des Rühlwandfusses.
- Vermessung der vorbeckenseitigen Baugrubenwand in zwei Messebenen A und B mit dem Distometer.
- Kontrolle der Kräfte zweier Vorspannanker in der Vor-

beckenmauer über Druckmessdosen. Während der gesamten Bauzeit war keine Kraftänderung festzustellen.

Auf die Rühlwandvermessung soll hier nicht weiter eingegangen werden, da sich die Bewegungen, speziell an den exponierten Stellen (Hochspannungsmast), innerhalb kleiner Grenzen hielten.

Wegen der Komplexität des Baugrundes und der Belastungen war den Messungen kein theoretisches Modell zugrunde gelegt, weshalb auch keine Deformationen infolge Entspannens vorausgesagt werden konnten. Für die Beurteilung der jeweiligen Situation beschränkte man sich deshalb auf den Vergleich mit der aufgrund der ersten Messung erhaltenen durchschnittlichen Deformationsgeschwindigkeit von 6 mm/Monat. Ein grosser Deformationsanstieg wurde gemessen, als knapp über der Baugrubensohle eine etwa 1 m mächtige Zone aus vielen dünnen Sandsteinlagen abwechselnd mit weichen Mergelschichten angetroffen wurde.

In dieser Phase musste festgestellt werden, dass das Messsystem mit dem Distometer für diesen Einsatz zu wenig flexibel war. Die Deformationen der Wand wurden zwar einwandfrei festgestellt, über ihre Verteilung in der Höhenlage konnte aber nichts ausgesagt werden. Zudem waren die Messungen sehr aufwendig, da sie vom Krankorb aus durchgeführt werden mussten und so die Baustelle jedesmal etwa zwei Stunden blockierten.

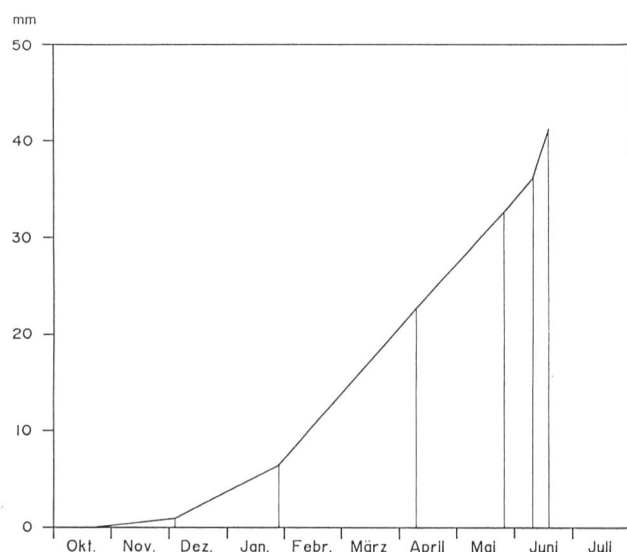


Bild 6-4. Resultate der Distometermessungen der Messstrecke B1.

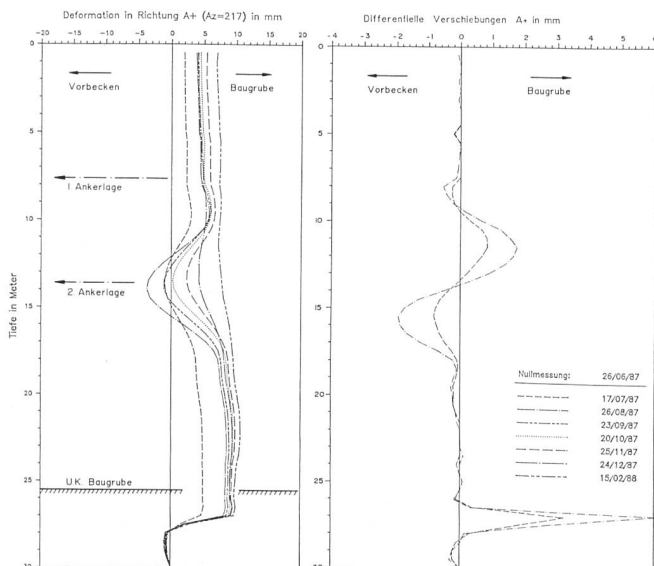


Bild 6–5. Resultate der Inklinometermessungen in Bohrung 3. Die Darstellung der differentiellen Verschiebungen zeigen die Ursprungsorte der Deformationen.

Verschiedene neue Risse in der alten Zentrale zeigten Bewegungen mit Auswirkungen auch bis 50 m weit von der Baugrube entfernt an. Aufgrund dieser Ereignisse und aus den Erfahrungen der Messungen der ersten Phase wurde das Messprogramm wie folgt geändert: Entlang der vorbekenseitigen Baugrubenwand wurden drei Bohrungen abgeteufelt und mit Inklinometerrohren versehen, was erlaubte, an drei Stellen der Baugrubenwand die Deformationen mit dem Inklinometer über die ganze Höhe schnell und einfach zu messen. Die Ausbreitung der Bewegung in grösserer Entfernung der Baugrube konnte mit vier aneinandergehängten Distometermessstrecken längs durch die alte Zentrale gemessen werden.

Aufgrund der Inklinometermessungen liess sich die Hauptursache der Deformationen in der weichen Mergelschicht im tiefsten Punkt der Baugrube lokalisieren (Bild 6–5). Deutlich zu erkennen waren auch die Schwächung des Felsens beim Kabelgang und die Wirkung der unteren Ankerreihe.

Die Distometermessungen durch die alte Zentrale zeigten, dass die Bewegungen der Baugrubenwand mit etwas Verzögerung, aber praktisch ungedämpft, auch noch in etwa 50 m Abstand von der Baugrubenwand registrierbar waren. Mit dem Beginn der Betonarbeiten klangen die Bewegungen rasch ab. Bis zur Fertigstellung der neuen Zentrale führte man die Messungen in grösseren Zeitabständen weiter, wobei nur das Leeren und Füllen des Vorbeckens noch kleine Auswirkungen zeigte.

Das Konzept hat sich gut bewährt, und die Baugrube konnte mit einem Minimum an Behinderungen durch Sicherungsmassnahmen ausgehoben werden.

Adresse der Verfasser: Ueli Sennhauser, dipl. Bauing. ETH, und Urs Stoller, dipl. Bauing. HTL, IUB Ingenieur-Unternehmung AG Bern, Thunstrasse 2, CH-3000 Bern 6.

## 7. Hydraulische Modellversuche

### 7.1 Allgemeines

Hanspeter Rohner

#### Zusammenfassung

Zur Sicherheit der gewählten Entlastungsanlage und zur Verbesserung der Strömungsverhältnisse wurden hydraulische Modellversuche durchgeführt und die Wirkungsgrade für die Rohrturbine mit einer Modellturbine ermittelt.

#### Résumé: Essais de modèles hydrauliques

Pour la sécurité de la construction de décharge et pour l'amélioration des conditions du courant, des expériences hydrauliques ont été réalisées. En outre, les efficacités pour la turbine (de tube) ont été trouvées à l'aide d'un modèle.

#### Summary: Hydraulic model experiments

For the security of the chosen spill-way construction and for the improvement of the current-conditions hydraulic experiments with a model have been realized. Furthermore efficiencies of the bulb turbine have been determined with a model.

Durch die Disposition der neuen Zentrale zwischen dem Hochspannungsmast und der bestehenden Zentrale stand die alte Entlastungsanlage mit den beiden Stauklappen und der Rinne nicht mehr zur Verfügung. Eine Störung auf elektrischer Seite hatte im Ausgangszustand nach der raschen zwangsweisen Schliessung des Leitapparates zur Folge, dass die gesamte Nutzwassermenge von 80 m³/s über zwei Klappen mit Gegengewicht (je 8 m breit und 2,2 m hoch) und über eine anschliessende Entlastungsrinne in die Aare geleitet wurde. Die Gegengewichte drückten die Klappen innert weniger Minuten in die Ausgangslage zurück, so dass die gesamte Nutzwassermenge über das Stauwehr Engehalden in die Aare (Ausleitungsstrecke) umgeleitet werden musste. Dieser Vorgang führte in der Ausleitungsstrecke um die Engehaldeninsel zu unerwünschten Schwallerscheinungen.

Bei den Betriebszuständen (Schnellschluss, Inselbetrieb, Anfahr- und Abstellvorgänge) stand nicht die Minimierung der Verluste im Vordergrund, sondern vielmehr die Einhaltung folgender Randbedingungen:

- Schwallerscheinungen in der Ausleitungsstrecke sind weitgehend zu vermeiden.
- Keine Betriebseinschränkungen.
- Der Beckenrand soll nicht wesentlich erhöht werden.
- Die Rückgabe in die Aare ist zu verbessern.

Als Standort für die Schwallentlastung wurde aufgrund eines Variantenstudiums die Grundablassöffnung des Beckens in der Mitte der bestehenden Zentrale gewählt. Die Anlage hat die Aufgabe, die Wassermenge von 80 m³/s jederzeit abzuführen (Bypass-System) und die Energie innerhalb des Gebäudes weitgehend zu vernichten. Die bescheidenen Platzverhältnisse – insbesondere die Aufteilung der Wassermenge auf die beiden benachbarten Abflusskanäle – machten eine Überprüfung der projektierten Anlagenteile in einem hydraulischen Modell nötig.

Als Schwallentlastungsorgane dienen eine Segment-schütze und eine Klappe. Daneben wurden zur Erhöhung der Sicherheit auf die Saugrohre der alten Turbine vier Überfallschächte aufgesetzt, die beim Versagen der Segmentschütze deren Abflussanteile übernehmen. Dabei muss in Kauf genommen werden, dass die gesamte Abflussmenge innert weniger Minuten über die Ausleitungsstrecke abgeleitet wird.

Bei der neuen Anlage wird das Nutzwasser im *Normalbetrieb* durch einen neuen Zulaufstollen mit zwei aneinanderfolgenden horizontalen bzw. vertikalen Krümmern der Turbine zugeleitet. Damit lassen sich die vorher beim Stollenaustritt ins offene Vorbecken entstandenen Energieverluste von bis zu 40 cm vermeiden. Allerdings galt es, die geometrischen Verhältnisse des neu zu bauenden Zulaufstollens, der den bestehenden Druckstollenanschluss mit der Turbine verbindet, in hydraulischer Hinsicht zu optimieren. Ein Zentimeter Gefällsgewinn entspricht einer Produktion von

rund 55000 kWh pro Jahr. Ebenfalls war die Form der Verbindungsöffnung zwischen dem neuen Zulaufstollen und dem Vorbecken auch im Normalbetrieb von entscheidender Bedeutung. Dafür wurden Versuche an einem hydraulischen Modell durchgeführt.

Die Modelluntersuchungen für die obenerwähnten Anlage-teile wurden der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH Zürich übertragen.

Am Institut für hydraulische Maschinen der ETH Lausanne wurden die *Wirkungsgrade* an einer Modellturbine des Turbinenlieferanten ermittelt. Dabei stand die Gewährleistung der vom Turbinenkonstrukteur angebotenen Wirkungsgrade im Vordergrund, wobei der Zulaufstollen in seiner richtigen geometrischen Form ebenfalls ins Modell integriert wurde. Das Ziel war, auf aufwendige Wirkungsgradmessungen an der Kraftwerkanlage verzichten zu können.

Adresse des Verfassers: Hanspeter Rohner, dipl. Ing. ETH, SIA, IUB Ingenieur-Unternehmung AG Bern, Thunstrasse 2, CH-3000 Bern 6.

**EWB**

**Kraftwerk Felsenau 1989  
Elektrizitätswerk der Stadt Bern**

## 7.2 Hydraulische Modellversuche

André Chervet

### Zusammenfassung

Die hydraulischen Modellversuche, welche im Zusammenhang mit der Erneuerung des Kraftwerks Felsenau durchgeführt wurden, werden hier präsentiert und deren Ergebnisse erläutert. In einem Modell im Massstab 1:20 wurde die Abflusskapazität der neuen Schwallentlastung bestimmt und die Energieumwandlung unterhalb der Entlastung, unter Beachtung einer störungsfreien Rückgabe des Wassers in die Aare, optimiert. Zudem werden Modellmessungen und Beobachtungen der Strömung in der Zuleitung zur neuen Rohrturbine beschrieben.

*Résumé: Essais hydrauliques sur modèle réduit pour l'aménagement de Felsenau*

Des essais hydrauliques sur modèle réduit ont été réalisés en rapport avec le renouvellement de l'aménagement hydroélectrique de Felsenau. Ils sont décrits ici et leurs résultats sont présentés. Dans un modèle à l'échelle 1:20, on a déterminé la capacité hydraulique de nouveau déchargeur et optimisé le fonctionnement du bassin de dissipation d'énergie situé à l'aval des ouvrages de décharge, en tenant compte des conditions de restitution de l'eau dans l'Aare. Des mesures et des observations effectuées en modèle sur l'écoulement dans la conduite d'amenée à la nouvelle turbine-bulbe sont également décrites.

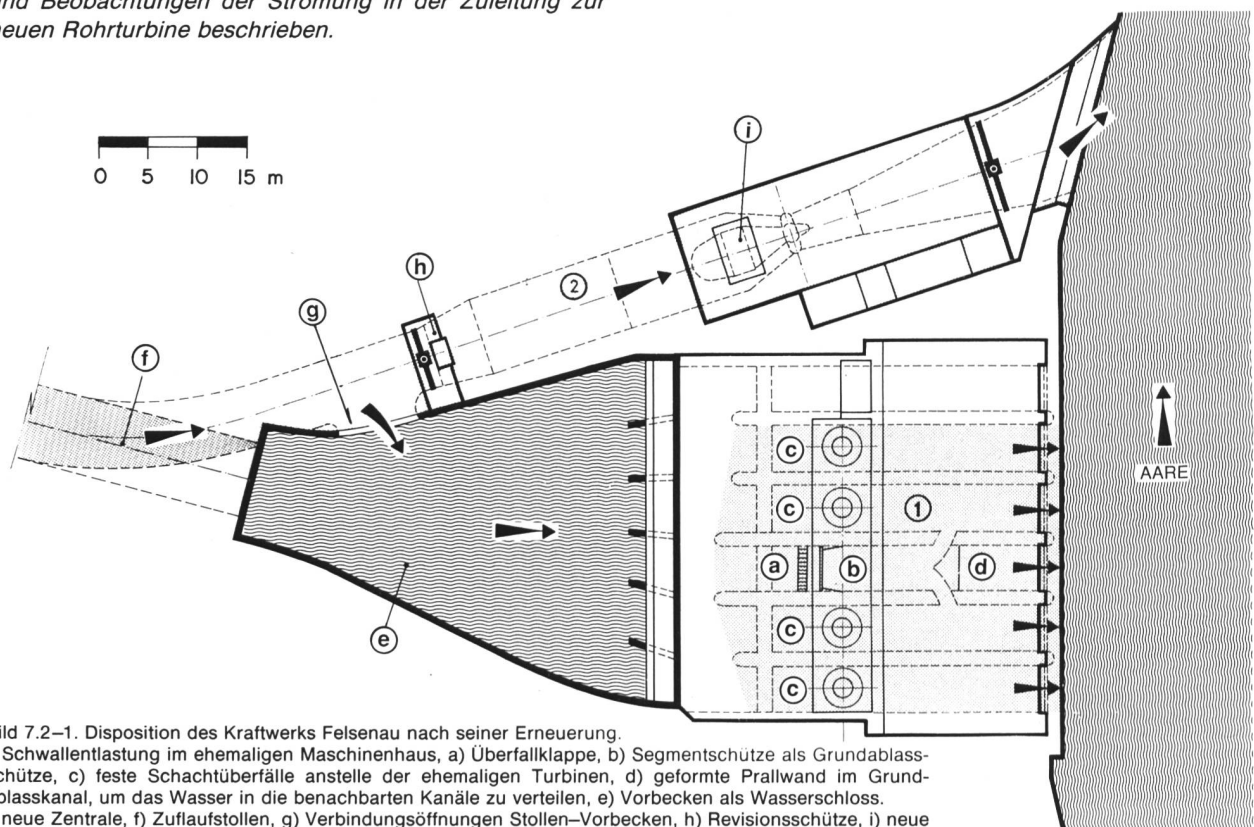


Bild 7.2–1. Disposition des Kraftwerks Felsenau nach seiner Erneuerung.

1 Schwallentlastung im ehemaligen Maschinenhaus, a) Überfallklappe, b) Segmentschütze als Grundablassschütze, c) feste Schachtüberfälle anstelle der ehemaligen Turbinen, d) geformte Prallwand im Grundablasskanal, um das Wasser in die benachbarten Kanäle zu verteilen, e) Vorbecken als Wasserschloss. 2 neue Zentrale, f) Zulaufstollen, g) Verbindungsöffnungen Stollen–Vorbecken, h) Revisionschütze, i) neue Rohrturbine.

## Summary: Hydraulic model tests for the Felsenau power plant

Hydraulic model tests have been carried out in connection with the refurbishing of the hydropower plant Felsenau. They are described here and their results are presented. In a model at scale 1:20, the hydraulic capacity of the new bypass head regulator has been determined and an optimization of the energy dissipation chamber situated just downstream the gates has been done under consideration of the conditions of restitution of the water to the river Aare. Measurements and observations made in the model concerning the flow in the headrace tunnel leading to the new bulb-type turbine are also described.

## Einleitung

Seit 1909 ist das Kraftwerk Felsenau des Elektrizitätswerks der Stadt Bern in Betrieb. Mit einer Ausbauwassermenge von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  wird ein Nettogefälle von 12 bis 14 m ausgenutzt. Bei den sukzessiven Abklärungen zur Sanierung bzw. zum Umbau der Anlage wurde die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich verschiedene Male und für diverse Anlagenteile durch das Elektrizitätswerk der Stadt Bern beauftragt, hydraulische Modellversuche durchzuführen. Schon in den Jahren 1940/41 und später in den Jahren 1977/78 wurde die Wasserfassung in der Aare beim Stauwehr Engehalde (siehe Situationsplan Seite 279) im Modell untersucht. Dies geschah, um den Eintritt von Geschiebe in den Zulaufstollen zu verhindern und den Abflussvorgang im Einlaufbauwerk zu verbessern. 1983 wurden weitere Versuche im Zusammenhang mit dem Umbau der Zentrale Felsenau zur Diskussion gestellt. Das von der Ingenieurunternehmung AG Bern ausgearbeitete Projekt zur Erneuerung der Zentrale sah den Einbau einer einzigen neuen Rohrturbine in ein neues Gebäude vor, das neben dem alten Maschinenhaus mit den fünf ausgedienten Zwilling-Francis-Turbinen erstellt werden sollte. Mit diesem Umbaukonzept konnten die alten Turbinen während des Baus weitgehend in Betrieb bleiben. Dadurch wurde jedoch die Rinne der an der linken Seite des Vorbeckens angebrachten ehemaligen Schwallentlastungsanlage mit der Baugrube für das neue Maschinenhaus belegt. Eine neue Schwallentlastung wurde deshalb im bestehenden Grundablasskanal der alten Zentrale sowohl als Übergangslösung während der Bauphase als auch als Teil der endgültigen Entlastung geplant, wie auf Bild 7.2–1 zu erkennen ist. Dieses Entlastungsorgan soll sich bei starkem Ansteigen des Wasserspiegels im als Wasserschloss dienenden Vorbecken automatisch rasch öffnen, damit bei Abschaltungen der alten Turbinen während der Umbauperiode sowie der neuen Turbine nach deren Inbetriebnahme Überschwemmungen vermieden werden (vergleiche Bild 5–1). Da sich die Abflussverhältnisse in der neuen Schwallentlastung nur ungenügend durch eine hydraulische Berechnung erfassen liessen, wurde zunächst

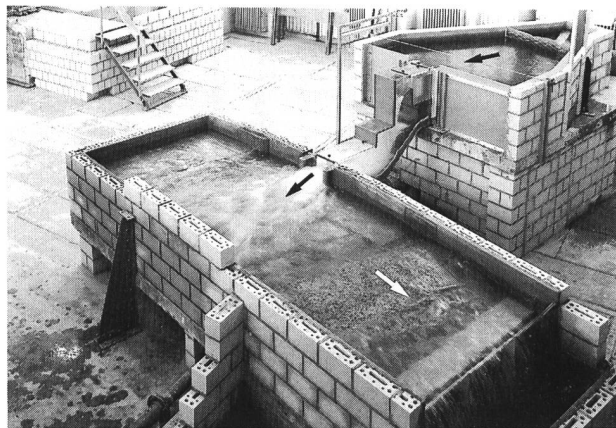
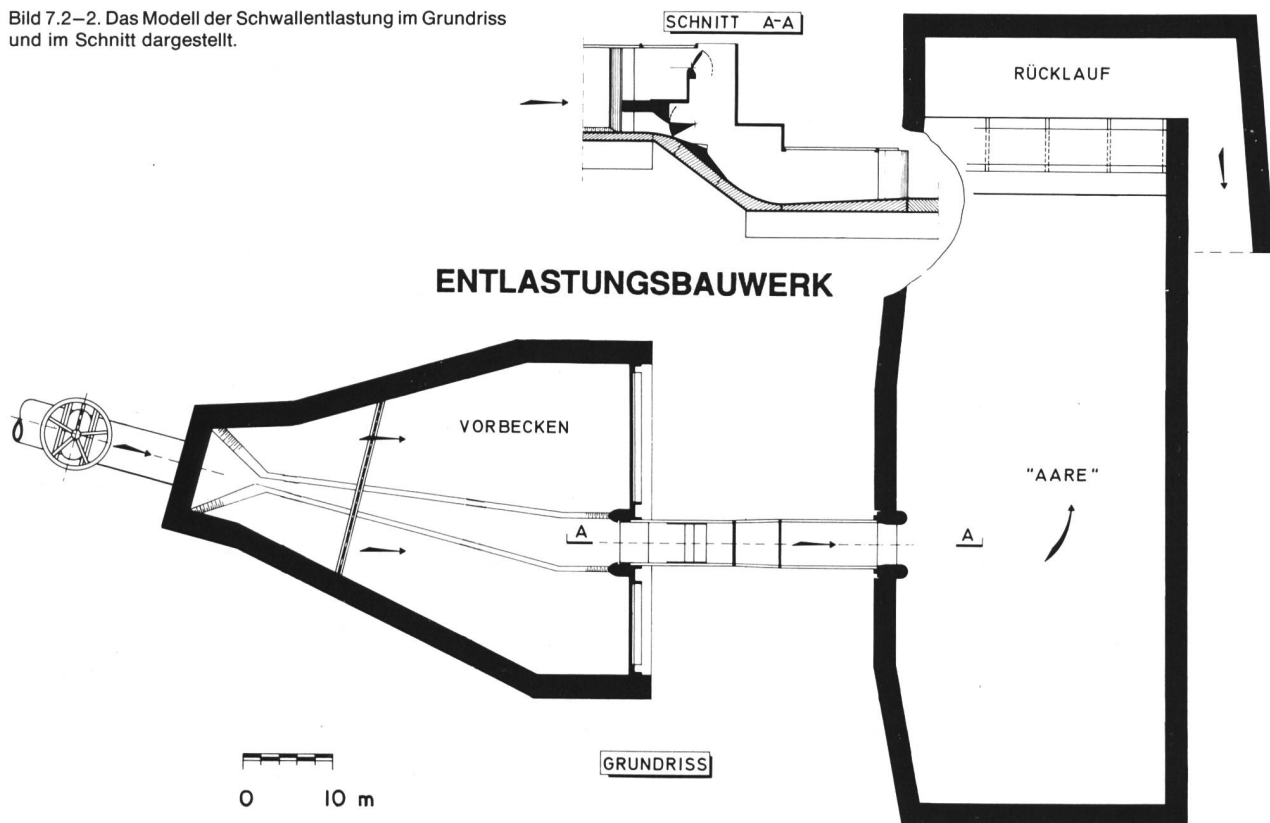
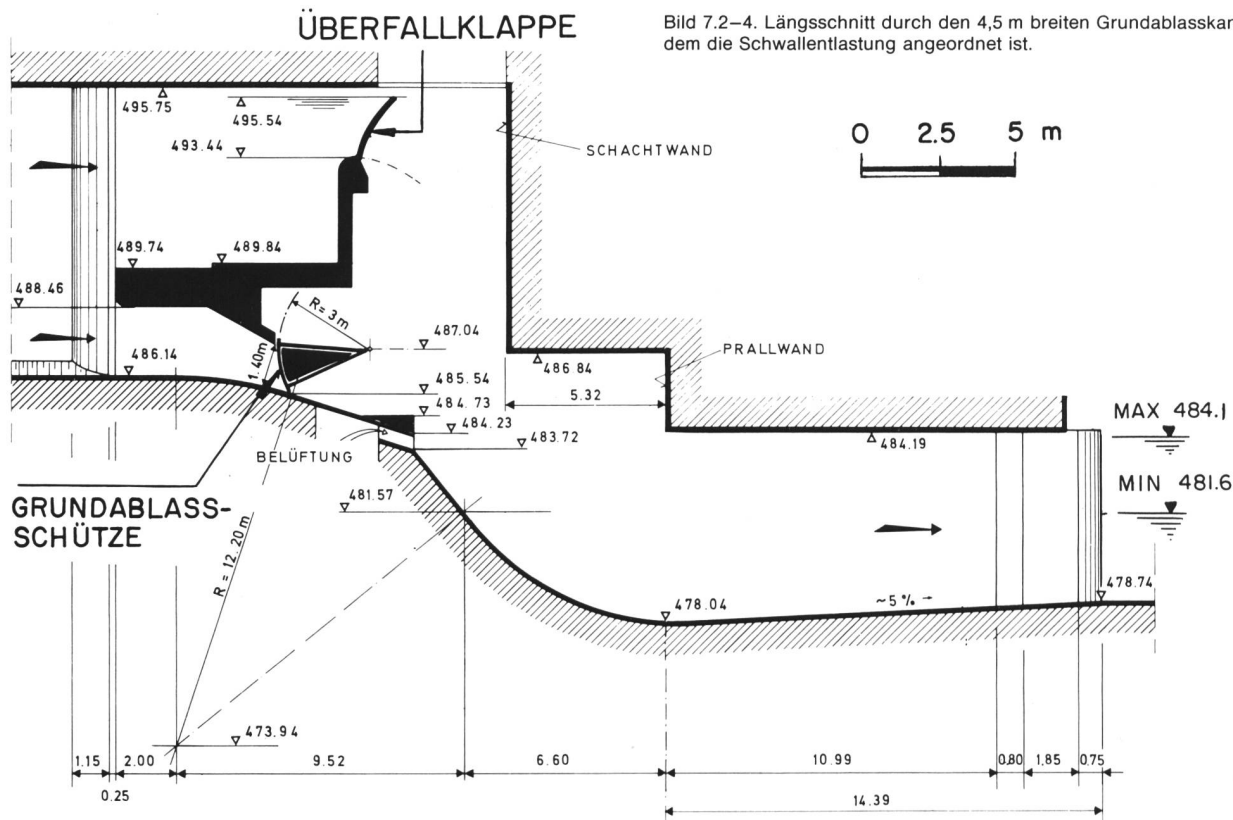


Bild 7.2–3. Ansicht des Modells Felsenau im Massstab 1: 20. Das ganze Vorbecken, der Grundablasskanal und eine Aarestrecke von etwa 75 m Länge und rund 28 m Breite wurden nachgebildet.

den sollte. Mit diesem Umbaukonzept konnten die alten Turbinen während des Baus weitgehend in Betrieb bleiben. Dadurch wurde jedoch die Rinne der an der linken Seite des Vorbeckens angebrachten ehemaligen Schwallentlastungsanlage mit der Baugrube für das neue Maschinenhaus belegt. Eine neue Schwallentlastung wurde deshalb im bestehenden Grundablasskanal der alten Zentrale sowohl als Übergangslösung während der Bauphase als auch als Teil der endgültigen Entlastung geplant, wie auf Bild 7.2–1 zu erkennen ist. Dieses Entlastungsorgan soll sich bei starkem Ansteigen des Wasserspiegels im als Wasserschloss dienenden Vorbecken automatisch rasch öffnen, damit bei Abschaltungen der alten Turbinen während der Umbauperiode sowie der neuen Turbine nach deren Inbetriebnahme Überschwemmungen vermieden werden (vergleiche Bild 5–1). Da sich die Abflussverhältnisse in der neuen Schwallentlastung nur ungenügend durch eine hydraulische Berechnung erfassen liessen, wurde zunächst

Bild 7.2–2. Das Modell der Schwallentlastung im Grundriss und im Schnitt dargestellt.





für dieses Problem eine Modelluntersuchung in Auftrag gegeben. In einer weiteren Phase wurde auch die Zuströmung zur neuen Rohrturbine im Modell untersucht. Der bestehende Zulaufstollen wird bis kurz vor der Einmündung im Vorbecken unverändert beibehalten. Durch eine angepasste Linienführung mit Krümmern in horizontaler und vertikaler Richtung wird das Wasser direkt der Rohrturbine zugeführt. Die optimale Gestaltung des neuen Abschnitts der Zuleitung und der Verbindungsöffnung mit dem Vorbecken, um die Energieverluste möglichst klein zu halten, war mit Modellversuchen am besten zu realisieren.

Die in den Jahren 1984 bis 1986 zur Untersuchung der neuen Schwallentlastung und der Zuleitung zur Rohrturbine durchgeführten Modellversuche sollen nachstehend beschrieben und deren Ergebnisse dargelegt werden.

### Die Modelluntersuchung der Schwallentlastung

Für die Sicherheit der gesamten Kraftwerkanlage ist eine gut funktionierende Schwallentlastung, die bei plötzlichem Notschluss der Turbine in fünf Sekunden das zufließende überschüssige Wasser direkt dem Unterwasser zuführt, von eminenter Bedeutung. Dieses Wasser muss auch – nach entsprechender Energieumwandlung – mit möglichst kleiner Geschwindigkeit wieder in die Aare eingeleitet werden, ohne dass dabei das Aarebett erodiert wird. Ohne Energieumwandlung würde das Wasser nach freiem Absturz aus dem Vorbecken mit Geschwindigkeiten von etwa 15 m/s in die Aare einschlagen.

Der Zweck der zuerst in Auftrag gegebenen Modelluntersuchung der Schwallentlastung war:

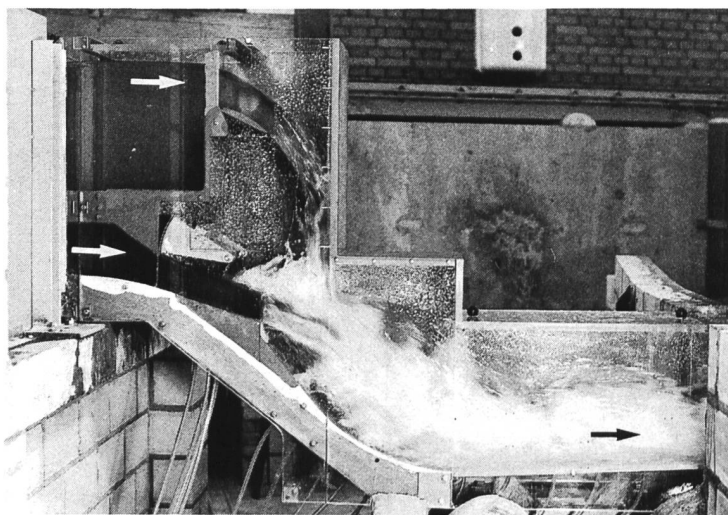


Bild 7.2-5. Entlastung von 80 m<sup>3</sup>/s im Grundablasskanal ohne Einbauten. Beide Entlastungsorgane sind in Betrieb, und das Wasser schießt fast ohne Energieumwandlung durch den Kanal.

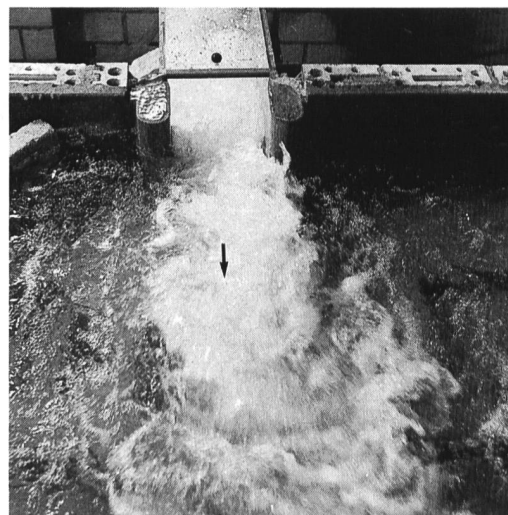


Bild 7.2-6. Entlastung von 80 m<sup>3</sup>/s im Grundablasskanal ohne Einbauten. Das Wasser kommt mit grosser Geschwindigkeit aus dem Kanal und erzeugt eine starke Störung quer zur Aare.

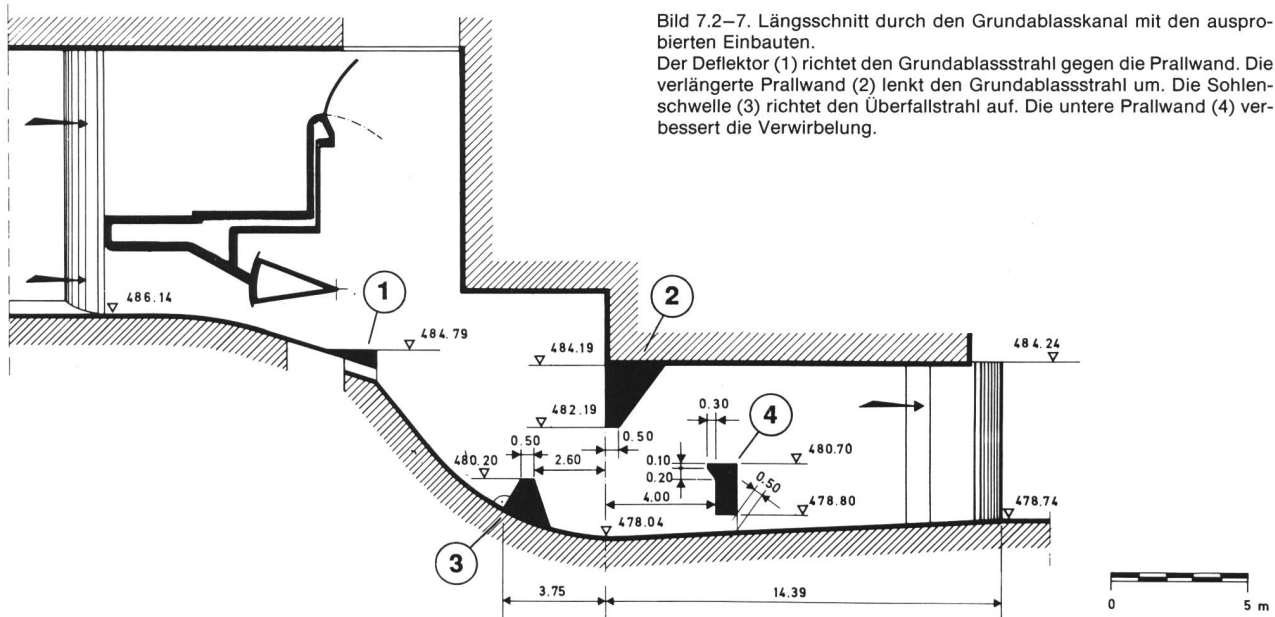


Bild 7.2–7. Längsschnitt durch den Grundablasskanal mit den ausprobierten Einbauten. Der Deflektor (1) richtet den Grundablassstrahl gegen die Prallwand. Die verlängerte Prallwand (2) lenkt den Grundablassstrahl um. Die Sohlenschwelle (3) richtet den Überfallstrahl auf. Die untere Prallwand (4) verbessert die Verwirbelung.

- Die errechnete Abflusskapazität der Entlastungsorgane (Segmentschütze und Überfallklappe) zu kontrollieren.
- Die Energieumwandlung im Kanal unterhalb der Entlastungsorgane mittels Ablenkungen und Schikanen so zu bewerkstelligen, dass das Wasser mit Geschwindigkeiten von nur etwa 5 m/s die Aare erreicht. Falls dies im untersuchten Durchlass nicht zu erreichen ist, sollte das Wasser auch auf die benachbarten Turbinenausläufe verteilt werden.
- Das Wasser sollte bei verschiedenen Wasserständen problemlos in die Aare zurückgegeben werden.

In einem Modell im Massstab 1: 20 wurde die projektierte Schwallentlastung nachgebildet und nach Froudescher Modellähnlichkeit untersucht. Das erstellte Modell ist auf den Bildern 7.2–2 und 7.2–3 ersichtlich. Es bestand hauptsächlich aus Elementen der ehemaligen Zentrale. Das Vorbecken, welches das aus dem Stollen zufließende Wasser auf die fünf Francis-Turbinen verteilte, wurde ganz nachgebildet. Als Fortsetzung wurde nur der zentral angeordnete, 4,5 m breite Grundablassdurchlass simuliert. Darin befinden sich die neuen Entlastungsorgane. Einerseits eine obere, 2 m hohe Überfallklappe mit 4,3 m lichter Weite, welche dafür sorgt, dass sie sich automatisch senkt, sobald ein Überstau im Vorbecken entsteht. Andererseits eine tiefliegende Segmentschütze als Grundablassschütze mit 1,4 m Höhe und 4,3 m lichter Weite, die sich ebenfalls rasch, innerhalb von 25 Sekunden, öffnet, um die erforderliche Entlastung zu bewirken. Die Abmessungen des Durchlasses sind dem Bild 7.2–4 zu entnehmen. Am Ende des Modells ist ein Abschnitt der Aare als Unterwasserstrecke nachgebildet. Damit war die Möglichkeit gegeben, die Wasserstände zu variieren und die durch die Rückgabe des Wassers beeinflusste Strömung zu beobachten.

Die ersten Versuche mit Wasser in einem Kanal ohne Einbauten haben gezeigt, dass eine genügende Entlastungskapazität erreicht werden kann. Die beiden vollständig offenen Entlastungsorgane können 80 m<sup>3</sup>/s abführen (mit einem Wasserstand im Vorbecken, der etwa 1 m tiefer liegt als das Stauziel von 495,54 m ü.M. beim Stauwehr). Bei einer solchen Entlastung (siehe Bild 7.2–5) wird das Wasser im Kanal durch Umlenken, Aufprallen und Zusammenstossen der Wasserstrahlen zwar belüftet, jedoch nur in ungenügender Weise beruhigt. Das Wasser fließt mit zu grosser Geschwindigkeit aus dem Kanal heraus (mit mehr

als 10 m/s) und bildet eine starke unzulässige Querströmung in der Aare (siehe Bild 7.2–6).

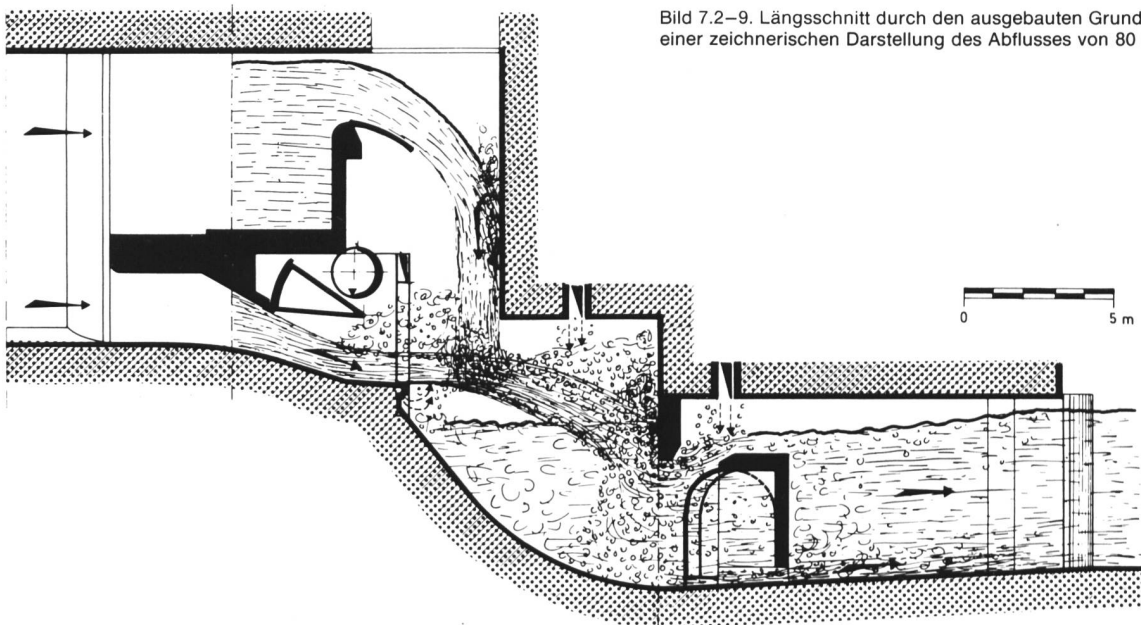
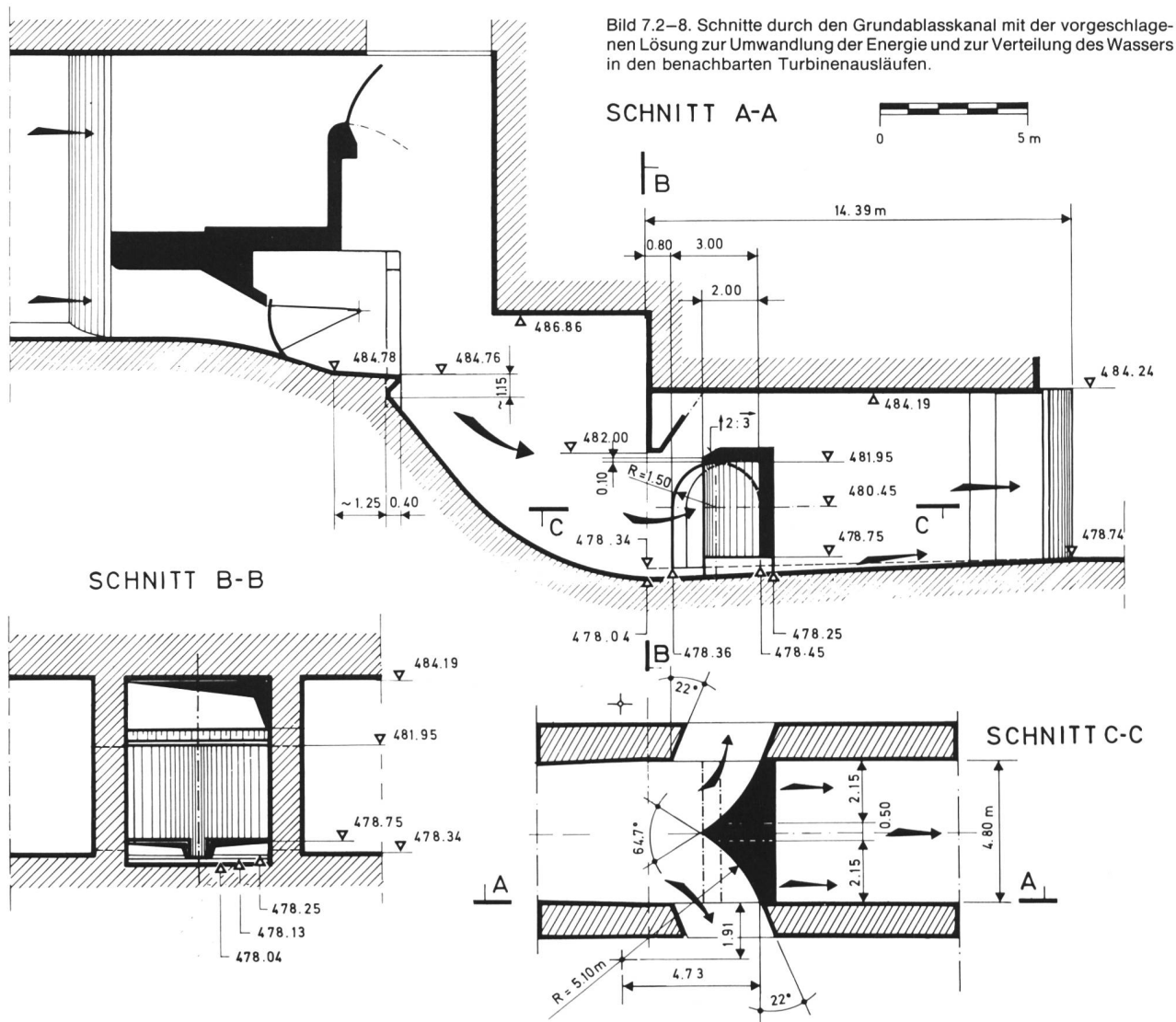
Um die Energieumwandlung im Grundablasskanal zu verbessern, sind feste Einbauten als Ablenkungskörper und Strahlaufteiler untersucht worden. Sie hätten für jede Wassermenge bis 80 m<sup>3</sup>/s und bei jedem Betriebszustand, das heisst Klappe allein, Segmentschütze allein und beide zusammen in Betrieb, wirken sollen. Bild 7.2–7 zeigt Lage und Dimensionen der ausprobierten Elemente. Ein stärkerer Deflektor bewirkt, dass der Grundablassstrahl vollständig gegen die verlängerte Prallwand auftrifft. Eine Sohlenschwelle ist nötig, um den fast senkrecht fallenden Überfallstrahl zu stören und umzulenken. Eine zweite Prallwand im unteren Bereich des Kanals zwingt das Wasser zur lokalisierten Verwirbelung und Energieumwandlung.

Die Energieumwandlung im Kanal wurde durch diese Einbauten eindeutig verbessert. Diese Massnahmen haben jedoch nur zu einem Teilerfolg geführt. Sie bildeten eine gangbare Lösung für eine Belastung von nur 35 bis 40 m<sup>3</sup>/s. Die Einbauten haben bei maximaler Belastung und hohen Wasserständen im Unterwasser zu einem unzulässigen Rückstau bis auf die Entlastungsorgane geführt. Es liess sich somit keine vernünftige Lösung finden, um den gesamten Abfluss durch einen einzigen Kanal abzuführen.

### Verteilung des Wassers auf drei Kanäle

Eine Modellerweiterung mit der Nachbildung von je zwei benachbarten Turbinendurchlässen auf jeder Seite des Grundablasses hat die Möglichkeit eröffnet, eine Lösung mit Verteilung des Wassers über mehrere Kanäle zu suchen. Durch eine seitliche Verteilung des Abflusses wird die Strömung im Bauwerk stark dreidimensional. Dies bedeutet, dass die Probleme komplizierter werden und der Abfluss viel empfindlicher auf geometrische Änderungen bzw. auf veränderte Betriebszustände reagiert. Ohne Modellversuche wäre es kaum möglich gewesen, folgende neue Fragen zu beantworten: An welcher Stelle des Bauwerks muss die Verteilung stattfinden? Wie wird die Verteilung erzwungen? Wie viele Kanäle werden mindestens benötigt?

Verschiedene Varianten für diese Verteilung mit hoch- und tiefliegenden Seitenöffnungen wurden im Modell untersucht. Es zeigte sich dabei, dass zahlreiche Abflusszustände für den zukünftigen Betrieb des umfunktionierten Bauwerks von entscheidender Bedeutung sein können. Es



konnte zum Beispiel bei hochliegenden Seitenöffnungen beobachtet werden, dass bei einer leichten Änderung der Segmentschützeinstellung von einer 100%igen zu einer 85%igen Öffnung, aber mit einer gleichbleibenden Entlastung von 80 m³/s, sich das Abflussverhalten im Bauwerk

vollständig verändern kann. Der verminderte Abfluss unter der Segmentschütze wurde durch einen erhöhten Abfluss über die Überfallklappe kompensiert. Diese geänderte Aufteilung der gleichen totalen Wassermenge verursachte eine Änderung des Auftreffpunktes auf die erste Prallwand und

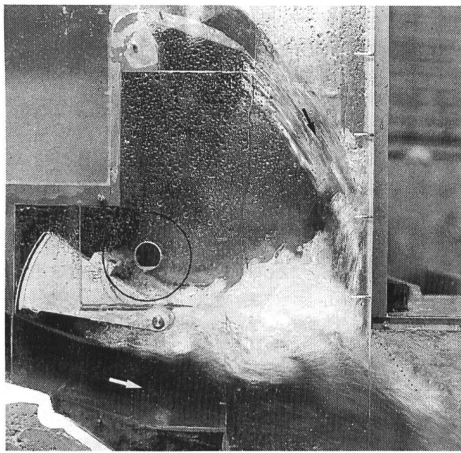


Bild 7.2–10. Seitenansicht der beiden Entlastungsorgane in Betrieb im Falle der vorgeschlagenen Lösung und bei hohem Aarewasserstand. Es ist kein Rückstau auf die Segmentschütze festzustellen.

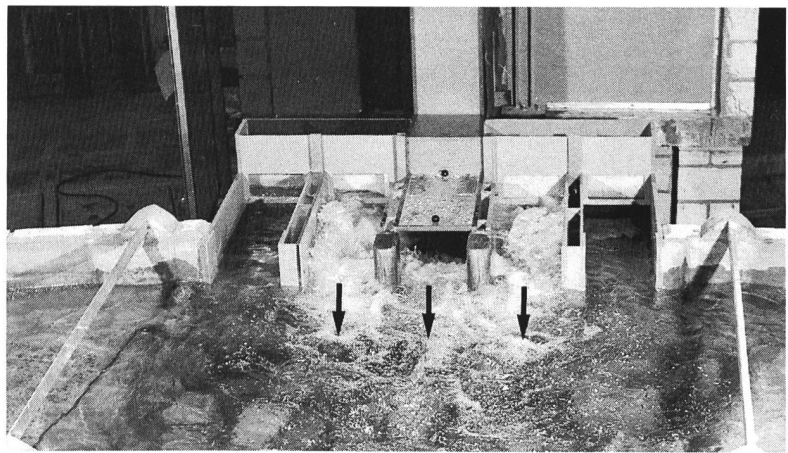


Bild 7.2–11. Entlastung von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  im Falle der vorgeschlagenen Lösung und tiefem Aarewasserstand. Das Wasser fliesst recht gleichmässig aus den drei benachbarten Kanälen heraus.

somit eine andere Verteilung durch die daneben angeordneten seitlichen Öffnungen. Es entwickelte sich somit, in kurzer Zeit und ohne Modifikation der Einbauten, aus einem zulässigen Abflusszustand mit guter Energieumwandlung eine ungünstige Situation mit unannehmbaren Rückgabebedingungen für die Aare. Solche Situationen zu erkennen und die geeigneten Massnahmen zu treffen, um sie zu vermeiden, verlangten einen hohen Versuchsaufwand.

Als zweckmässig hat sich eine Variante erwiesen (Bild 7.2–8), bei welcher die tiefliegenden seitlichen Öffnungen in die benachbarten Kanäle von je  $9,7 \text{ m}^2$  Fläche unmittelbar vor der zweiten Prallwand plziert wurden. An dieser Stelle strömt die gesamte Abflussmenge unabhängig vom Abflusszustand vorbei. Die Anordnung einer geformten Prallwand, die als Strahlteiler und Leitkörper wirkt, gewährleistet eine optimale seitliche Umlenkung des Wassers. Die Durchströmung von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  im umgestalteten Entlastungsbauwerk ist auf Bild 7.2–9 skizziert. Unter dem Leitkörper sind die Öffnungen angebracht, welche die im Grundablasska-

nal verbleibende Wassermenge bestimmen. An der Oberseite des Leitkörpers ist eine horizontale Platte vorgesehen, die die Kanaldecke vor aufwärts gerichteten Strömungen wirksam schützt. Mit dieser Variante wird ein Einstau der Abflussorgane auch bei hohem Aarewasserstand vermieden. Bild 7.2–10 zeigt den freien Abflusszustand in der Nähe der offenen Entlastungsorgane beim Durchfluss von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  und bei hohem Aarewasserstand.

Die Verteilung der Wassermenge auf die zwei benachbarten Kanäle ist so erzwungen, dass sowohl bei hohen wie bei tiefen Aarewasserständen die Austrittsgeschwindigkeiten des Wassers überall unter  $5 \text{ m/s}$  bleiben. Bei hohem Aarewasserstand ist das Wasser ungleich verteilt. Durch die seitlichen Turbinendurchlässe fließen je etwa  $\frac{2}{3}$  der totalen maximalen Wassermenge, durch den mittleren Grundablasskanal strömt nur  $\frac{1}{3}$ . Bei tiefem Aarewasserstand bringen alle drei beanspruchten Durchlässe etwa  $\frac{1}{3}$  der Wassermenge. Bild 7.2–11 zeigt den Austritt von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  aus den drei nebeneinanderliegenden Kanälen bei tiefem Aarewasser-

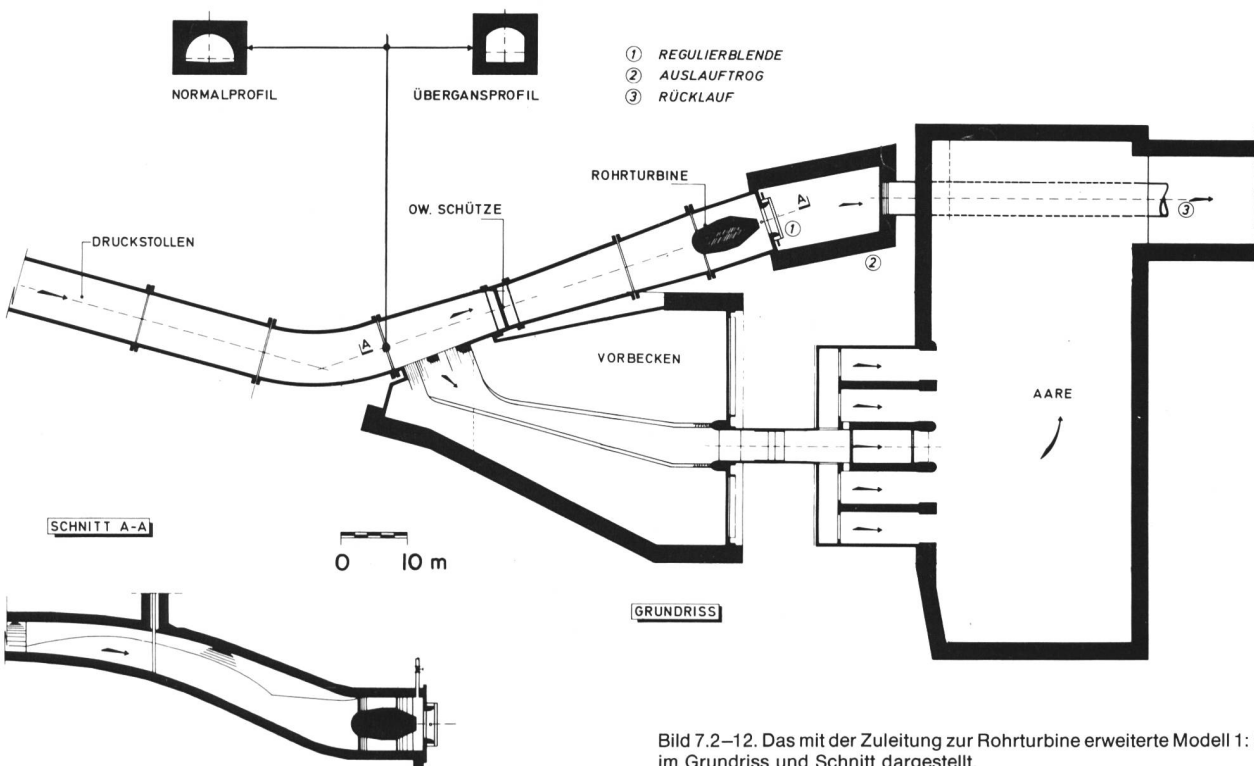


Bild 7.2–12. Das mit der Zuleitung zur Rohrturbine erweiterte Modell 1: 20 im Grundriss und Schnitt dargestellt.

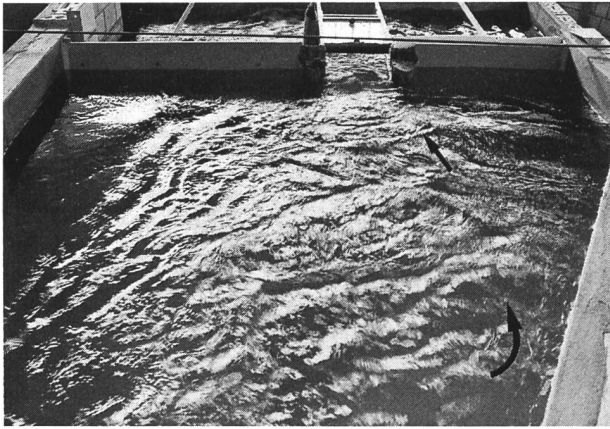


Bild 7.2–13. Durchfluss von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  durch das Vorbecken bei Entlastungsbetrieb der Rohrturbine. Der Wasserspiegel im Vorbecken sieht etwas rauh aus, was auf eine intensive Durchströmung deutet.

stand. Die Verteilung des Wassers ist und sieht gleichmässig aus, und die Ausbreitung einer Störung in der Aare bleibt sehr lokal.

### Die Modelluntersuchung der Zuleitung zur Rohrturbine

Der Kern der Erneuerung des Kraftwerks Felsenau ist die Installation der neuen Rohrturbine. Die Vorabklärungen durch die Ingenieurunternehmung AG Bern haben gezeigt, dass eine direkte Zuleitung des Aarewassers zur Rohrturbine, ohne Vorschaltung des bestehenden Vorbeckens, energetisch vorteilhaft ist. Trotzdem blieben noch einige Fragen im Modell abzuklären. Wie soll die seitliche Verbindungsöffnung zwischen Zuleitungsstollen und Vorbecken gestaltet werden, damit bei Turbinenbetrieb die Energieverluste möglichst klein bleiben? Wie verhält sich das Vorbecken bei Turbinenbetrieb in Bezug auf Strömung und induzierte Strömung? Wie verhalten sich die Verbindungsöffnung, das Vorbecken und die Schwallentlastungsanlage bei Entlastungsbetrieb der Rohrturbine? Wie sieht die Geschwindigkeitsverteilung in der Zuleitung zur Turbine aus, und welche Energieverluste sind im Turbinenbetrieb zu erwarten?

Das früher beschriebene Modell im Massstab 1:20 wurde für diesen zusätzlichen Auftrag umgebaut und durch die Zuleitung zur Turbine ergänzt (Bild 7.2–12). Auch der Körper der Turbine wurde nachgebildet, aber ohne rotierende Teile.

Nach dem Prüfen verschiedener Gestaltungsvarianten der Verbindung zwischen dem Zuleitungsstollen und dem Vorbecken konnte eine Lösung mit *zwei* Rechtecköffnungen als optimal empfohlen werden. Diese zwei rund 4 m hohen Öffnungen mit Längen von 3,4 m und 2,8 m weisen eine Gesamtfläche von etwa  $24 \text{ m}^2$  auf. Die Energieverluste, die durch die Wirkung der Öffnungsformen auf die Stollenströmung entstehen, waren so minim ( $\sim 1 \text{ cm W. S.}$ ), dass sie im Modell kaum erfasst und als Kriterium für die Beurteilung der Güte der Öffnung nicht benützt werden konnten. Ein besonderes hydraulisches Verhalten der Strömung in diesem Bauwerk, wo ein Abfluss unter Druck an einem Becken mit ruhendem Wasser vorbeiströmt, konnte dennoch als Kriterium verwendet werden. Das Becken reagierte auf eine schlecht geführte Strömung bei der Öffnung mit einer Eigenschwingung und einer induzierten Zirkulationsströmung.

Zum Beispiel im Fall einer einzigen langen Öffnung (4 m hoch und 8 m lang) wurde das Vorbecken durch die Strö-

mung an der Öffnung in Schwingung versetzt. Ein regelmässiges Schwanken des Wasserspiegels bis zu  $0,5 \text{ m}$  Höhenunterschied mit einer Frequenz von  $0,24 \text{ Hz}$  wurde beim Turbinenbetrieb mit  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  beobachtet. Diese Schwingung sowie eine stärkere Zirkulationsbewegung im Becken wurden durch die zu lange freie Kontaktzone zwischen Stollenströmung und ruhendem Wasser im Becken verursacht. Ein kleiner Anteil der Stollenströmung konnte seitlich im Takt ausweichen und die Beckenbewegungen induzieren. Eine Reduktion der Länge durch Unterteilung der Öffnung hat Abhilfe geschaffen. Bei der vorgeschlagenen Lösung findet während des Turbinenbetriebs mit  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  nur ein minimaler Austausch von Wasser zwischen Zuleitung und Vorbecken statt, und somit bleibt das Wasser im Vorbecken ruhig.

Beim Betrieb der Schwallentlastung fliesst, wie vorgesehen, das gesamte Wasser aus dem Stollen durch die Verbindungsöffnungen zum Vorbecken und anschliessend durch das Entlastungsbauwerk problemlos bis zur Aare. Die Strömung im Vorbecken ist recht unruhig, wie auf Bild 7.2–13 zu erkennen ist. Der Wasserspiegel erhöht sich lokal an der Stelle, wo der Strahl an der Beckenwand auftrifft.

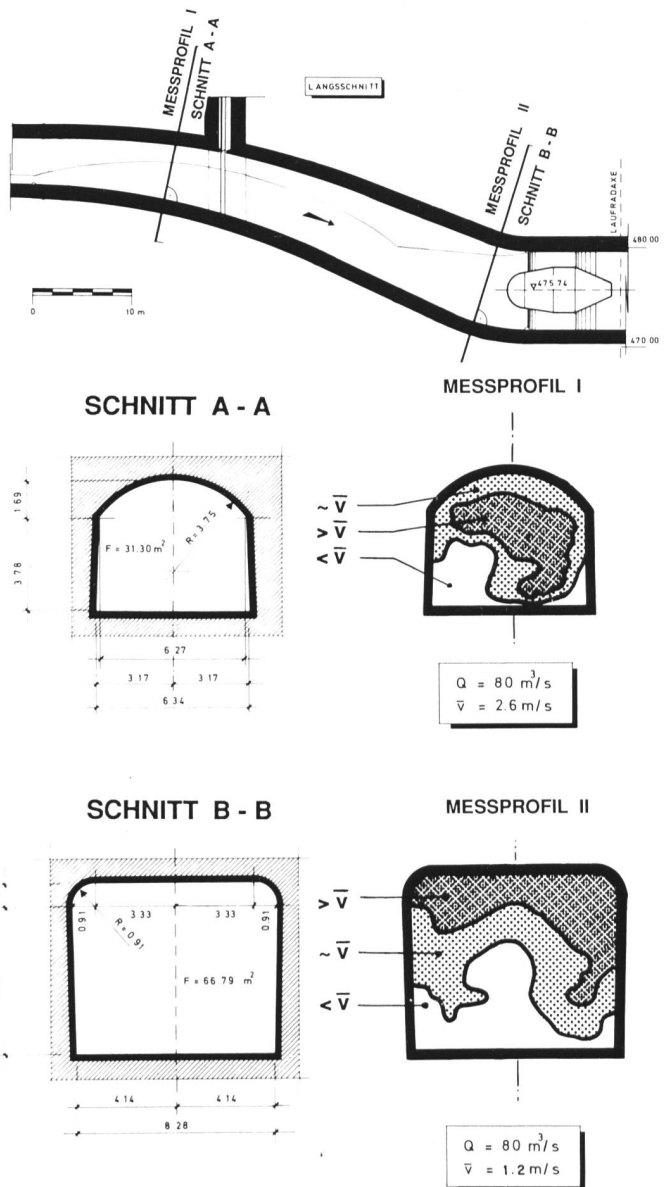


Bild 7.2–14. Längsschnitt durch die Zuleitung zur Rohrturbine und Angaben über die Querschnittsabmessungen sowie über die gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen beim Turbinenbetrieb von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Eine ausgeglichene Geschwindigkeitsverteilung im Turbinenzuleitungsstollen ist in bezug auf den Wirkungsgrad von Interesse und konnte durch Messungen in verschiedenen Querschnitten bestimmt werden. Auf einer Distanz von etwa 70 m findet in der Zuleitung ein Übergang vom Normalprofil des alten Stollens mit 26 m<sup>2</sup> Durchflussfläche zu einem Quasirechteckprofil kurz oberhalb der Turbine mit 66 m<sup>2</sup> Fläche statt. Diese Strecke weist, bedingt durch die topographischen Gegebenheiten, einen horizontalen Krümmer und einen vertikalen Absturz in S-Form auf, um das Wasser bis zur tiefliegenden Turbine zu führen. Diese geometrischen Änderungen der Zuleitungsstrecke blieben nicht ohne Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung, auch wenn auf eine Querschnittsfläche, die mit der Distanz nur zunimmt, und auf möglichst grosse Krümmungsradien geachtet worden ist. Die Strömung hat die Tendenz, sich auf die Aussenseiten der Krümmungen zu konzentrieren (Bild 7.2–14). Eine ausgeglichene Geschwindigkeitsverteilung war mit den starken Richtungsänderungen, kombiniert mit Querschnittserweiterungen, somit nicht zu erreichen. Die Messungen im Modell haben jedoch die Zweckmässigkeit einer maximalen Streckung der Linienführung erwiesen. Die Messung der Drucklinie in diesem letzten Abschnitt und die Bestimmung der Energieverluste unter Berücksichtigung der unausgeglachten Geschwindigkeitsverteilung hat eine genauere Bestimmung des Nettogefälles erlaubt. Erst der Betrieb der Rohrturbine wird zeigen, ob die Modellprognose korrekt war.

### Schlussbemerkungen

Im Gegensatz zu einer Studie für eine neue Kraftwerkanlage sind bei diesen Modelluntersuchungen im Zusammenhang mit der Erneuerung des Kraftwerks Felsenau mehr unkonventionelle hydraulische Probleme zur Diskussion gekommen. Durch die gegebene gedrungene topographische Lage und das gewählte Umbaukonzept ergaben sich zwangsweise spezielle Fragen. Die Beobachtung von Abflusszuständen, die nur selten auftreten, oder von Phänomenen, die in der Grossausführung nur an unzugänglichen Stellen zum Vorschein kommen, war im Modell jederzeit möglich. Der hydraulische Modellversuch erlaubte es, alle gestellten Fragen befriedigend zu lösen. Dazu war das Modell auch ein nützliches Instrument, um dem Bauherrn und dem Ingenieur die Zuversicht über die Richtigkeit der gewählten hydraulischen Lösung zu geben. Auch das war ein wichtiges Ergebnis des Modellversuchs.

#### Literatur

VAW, Kraftwerk Felsenau, Umbau der Schwallentlastung. Bericht über die Modellversuche zuhanden des Elektrizitätswerkes der Stadt Bern. Zürich, Dezember 1984. Bericht der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 881 (unveröffentlicht).

VAW, Kraftwerk Felsenau, Erneuerung der Zentrale. Bericht über die Modellversuche zuhanden des Elektrizitätswerkes der Stadt Bern. Zürich, Dezember 1986. Bericht der VAW Nr. 895/925 (unveröffentlicht).

de Vries, F.: Model tests for the Reconstruction of the Felsenau Plant, Switzerland. Paper presented to the International Conference on Upgrading and Refurbishing Hydro Powerplants – II, Zurich, October 1989 (to be published).

Adresse des Verfassers: André Chervet, dipl. Bau-Ing. ETHZ, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.

## 7.3 Modellturbinen- Abnahmeversuch

Pierre Henry

### Zusammenfassung

*Nach Erläuterung der Versuchsziele wird die Versuchseinrichtung des «Institut de Machines Hydrauliques et de Mécanique des Fluides (IMHEF)» genauer beschrieben und deren Messfehler abgeschätzt. Als nächstes wird die Berechnung der Betriebscharakteristik der Grossausführung dargelegt. Zum Abschluss werden Modellturbine und Versuchsergebnisse besprochen.*

### Résumé: Essais de réception sur modèle réduit de la turbine

*Après une courte introduction donnant le but des essais, l'installation d'essai est décrite en détail. L'estimation des erreurs de mesure ainsi que le calcul des performances du prototype sont abordés par la suite. L'article se termine par la description du modèle d'essai et par des commentaires sur les résultats.*

### Summary: Model acceptance tests of the turbine

*After a short introduction describing the aim of the tests, the test installation is explained in detail. The error estimation and the computation of the prototype performance are developed. The contribution ends with the description of the turbine model and some comments on the test results.*

### Zweck der Versuchsserie

Der Abnahmeversuch an einer Modellturbine ist ein Markstein bei der Ausführung eines hydroelektrischen Kraftwerks. Mit diesem Versuch werden die wichtigsten vom Hersteller angegebenen Garantiedaten wie Leistung, Wirkungsgrad, Kavitationskennwerte und Durchbrenndrehzahl ermittelt bzw. nachgewiesen. Der Abnahmeversuch wird jeweils so vor der Herstellung der Grossausführung (Prototyp) durchgeführt, dass eventuelle Änderungen noch rechtzeitig möglich sind. Bei Modellversuchen können die Betriebsbedingungen (Fallhöhe, Wasserstrom) einfacher, in einem grösseren Bereich und meistens genauer verändert werden als bei Abnahmeversuchen an der Grossausführung.

### Versuchseinrichtung

Das «Institut de Machines Hydrauliques et de Mécanique des Fluides» (IMHEF) besitzt einen leistungsfähigen Prüfstand für Versuche mit hydraulischen Modellmaschinen. Dieser Prüfstand entspricht den strengen Vorschriften der IEC (International Electrotechnical Commission) für Versuche mit Modellen hydraulischer Reaktionsmaschinen (Francis-, Kaplan-, Rohrturbine, Pumpe) [1] [2].

Am IMHEF wurden Modellturbinen-Abnahmeversuche für die grössten Kraftwerke der Welt, wie für Itaipu und Porto Primavera in Brasilien, sowie für sämtliche Kraftwerke der kanadischen Grossanlage von Baie James durchgeführt. Bild 7.3–1 stellt eine Perspektivansicht der Versuchseinrichtungen dar.

Die spezifische hydraulische Energie (Fallhöhe) und der Wasserstrom werden von einer Pumpe mit variabler Dreh-

Bild 7.3–1. Perspektive der Versuchseinrichtungen des IMHEF. 1 Rohrturbinen-Modell, 2 Francisturbinen-Modell, 3 Hauptpumpe, 4 Eichtank, 5 Messkabine.

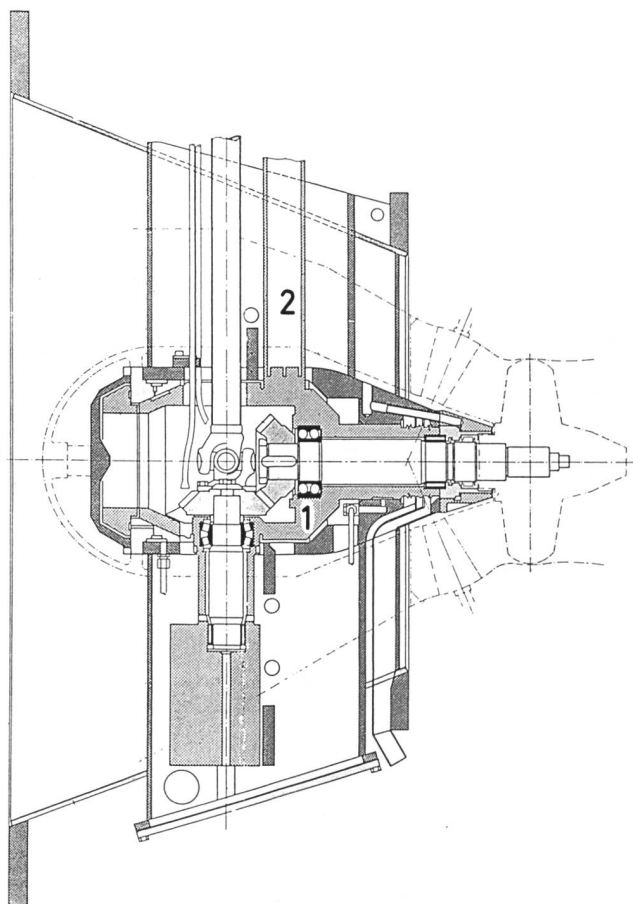
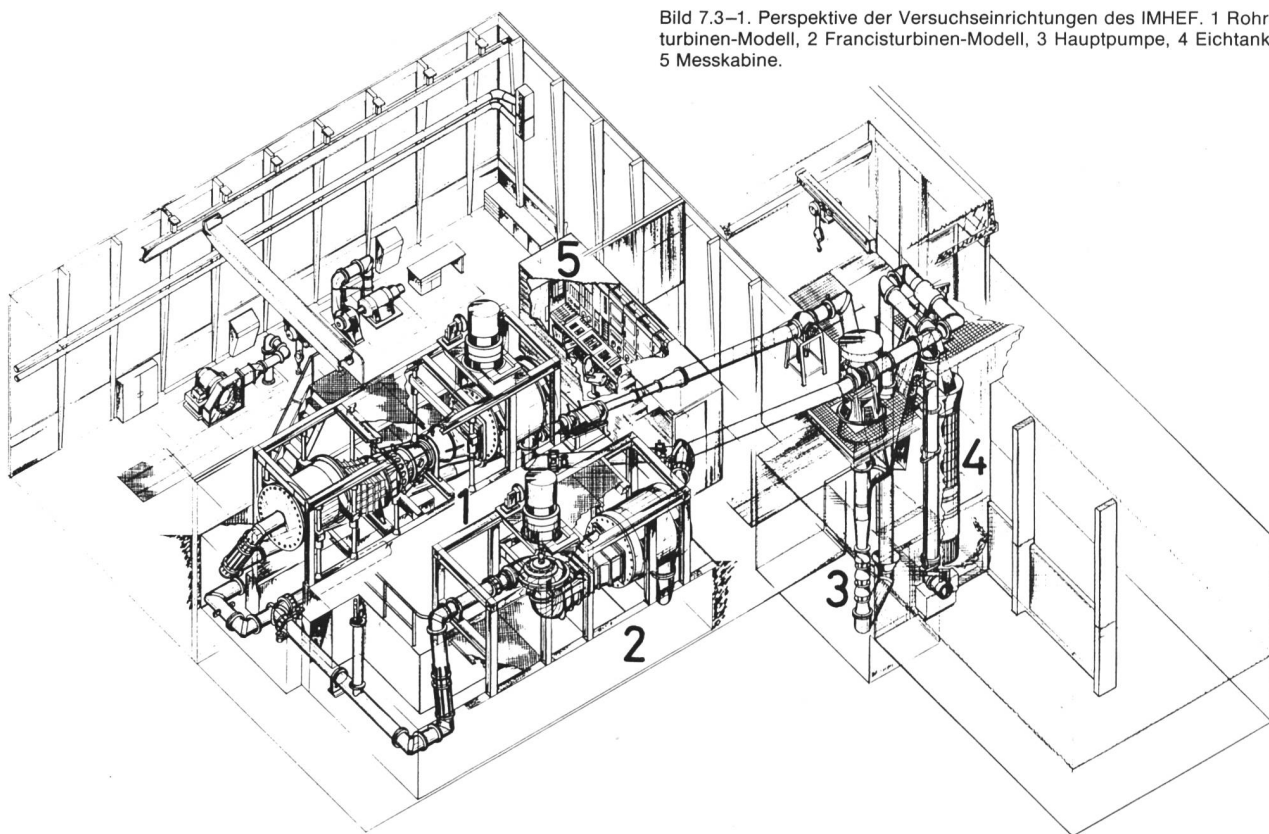


Bild 7.3–2. Schnitt durch die Rohrturbinen-Lagerung mit Kegelradgetriebe zur Leistungsübertragung (Bauart Aströ). Der am hydrostatisch gelagerten Pendelteil 1 befestigte Hebelarm 2 dient zur Drehmomentübertragung.

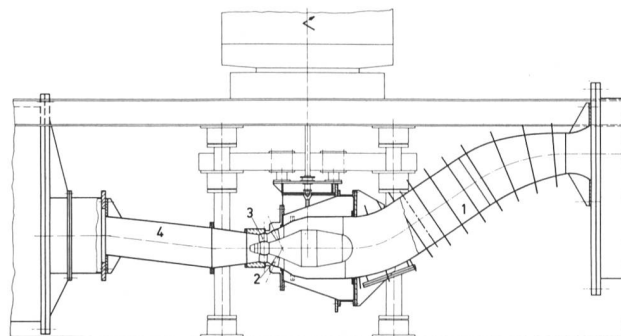


Bild 7.3–3. Schnitt durch die Modellturbine mit S-förmigem Einlauf 1, Leitapparat 2, Laufrad 3 und Saugrohr 4.

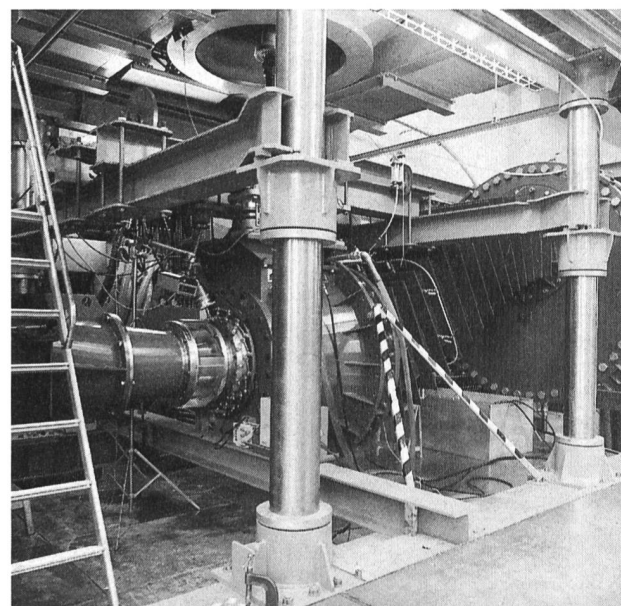
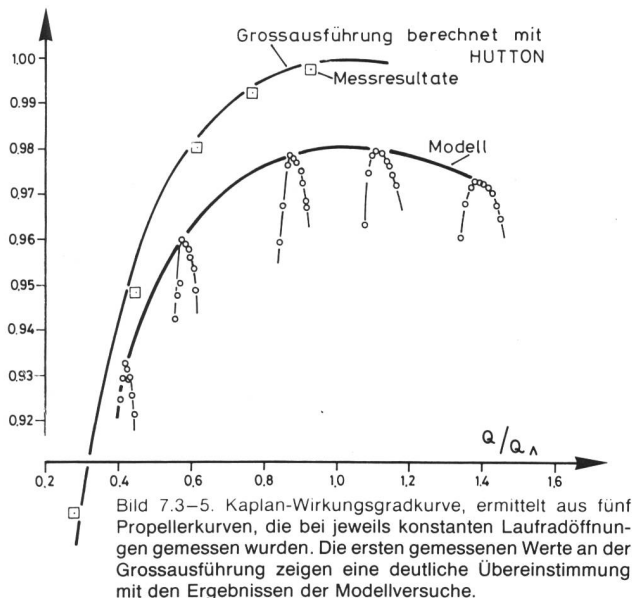


Bild 7.3–4. Im Prüfstand des IMHEF eingebaute Modellturbine Felsenau.



zahl geliefert, die es gestattet, die Betriebsdaten in einem weiten Bereich zu verändern.

Es werden Messgeräte mit sehr hoher Genauigkeit verwendet.

Der Wasserstrom  $Q$  wird mittels eines elektromagnetischen Durchflussmessgeräts ermittelt, das mit einem 150 m<sup>3</sup> fassenden Behälter geeicht wurde. Die relative Genauigkeit beträgt  $\Delta Q/Q = \pm 0,1\%$ .

Druckgeber (Messprinzip mit Dehnungsmessstreifen oder kapazitiv), die mit Gewichts- bzw. Quecksilber-Manometer geeicht werden, ermöglichen die Ermittlung der spezifischen hydraulischen Energie  $E$  mit derselben Genauigkeit:  $\Delta E/E < \pm 0,1\%$ .

Die vom Laufrad erzeugte mechanische Leistung (im Fall Felsenau mit horizontaler Wellenlage) wird dem Gleichstrom-Elektromotor mittels eines Kegelradgetriebes übertragen (Bild 7.3-2).

Lagerung, Dichtungen sowie der Zahnradsatz sind mit einem Pendellagersystem hydrostatisch gelagert. Damit erreicht man eine sehr genaue Messung des Drehmoments  $T$  ( $\Delta T/T < 0,25\%$ ).

Die Drehmomentmessung ist sehr heikel, denn die Reibung in der Lagerung, den Dichtungen und dem Zahnradsatz muss getrennt gemessen werden, um die effektive Leistung des Laufrades ohne mechanische Verluste (die bei Modell und Grossausführung sehr unterschiedlich sind) zu erhalten. Der resultierende Wirkungsgrad  $\eta$  weist die sehr hohe Genauigkeit von  $\Delta \eta/\eta < \pm 0,3\%$  auf.

Die Genauigkeit der Umrechnung von Modelldaten auf Anlagebedingungen kann heutzutage als befriedigend betrachtet werden [3].

Reynolds-Ähnlichkeit kann im Modellversuch nicht eingehalten werden. Dies führt auf grössere relative Reibungsverluste, d.h. auf zu tiefe Wirkungsgrade beim Modellversuch. Die Wirkungsgradaufwertung für die Grossausführung Felsenau wurde mit der klassischen Formel von Hutton berechnet:

$$\Delta \eta = 0,7 (1 - \eta_m) [1 - (\text{Re}_m / \text{Re}_p)^{0,2}]$$

wobei

$\Delta \eta$ : Wirkungsgraddifferenz zwischen Grossausführung und Modell

$\eta_m$ : Maximalwert des Modell-Wirkungsgrades

$\text{Re}_p, \text{Re}_m$ : Reynoldszahl der Grossausführung und des Modells

Der Faktor 0,7 gibt an, dass 70% der Verluste Reibungsverluste sind, die von der Reynoldszahl abhängen.

Die Übertragbarkeit der Kavitationseigenschaften ist schwieriger. Dank modernen Forschungsarbeiten, zu denen diejenigen des IMHEF zählen, wird die Voraussage des Kavitationsverhaltens der Grossausführung laufend genauer.

Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass Kavitation in hydraulischen Maschinen weitreichende Folgen haben kann wie Lärm, Schwingungen, Verminderung von Wirkungsgrad und Leistung sowie Materialerosion am Laufrad und an benachbarten Teilen. Deshalb muss bei Abnahmeversuchen das Kavitationsverhalten besonders sorgfältig überprüft werden.

Die Voraussage des Kavitationsverhaltens stützt sich auf die «Thoma-Kennzahl», die für Modell und Grossausführung gleich sein muss:

$$\sigma = (H_b - H_v - H_s) / H$$

wobei

$H$ : Netto-Fallhöhe

$H_b$ : äquivalente Höhe des atmosphärischen Drucks

$H_v$ : äquivalente Höhe des Dampfdrucks (entsprechend der Wassertemperatur)

$H_s$ : Höhenunterschied zwischen Unterwasserspiegel und Laufradachse

Man beachte, dass die Kennzahl  $\sigma$  die Einbauhöhe des Laufrades bezüglich des Unterwasserspiegels festlegt.

### Die Modellturbine

Das Modellaufgrad hat einen Durchmesser von 340 mm (Grossausführung: 3800 mm), d.h. der Modellmassstab beträgt 1:11,18. Das Modell umfasst die Turbine selbst samt Saugrohr und S-förmigem Einlauf, der wegen der topographischen Gegebenheiten resultierte. Der Einlaufquerschnitt nimmt in Strömungsrichtung zu, was im Hinblick auf eine gleichmässige Strömung am Turbineneintritt ungünstig ist. Der Flächenverlauf wurde bewusst so gewählt, um eine möglichst wahrheitsgetreue Geschwindigkeitsverteilung zu erhalten. Bild 7.3-3 stellt einen Modellquerschnitt dar. Die Genauigkeit der Modellherstellung spielt eine wesentliche Rolle. Die nachgemessenen Abweichungen zwischen den Modellaufschaufeln und der theoretischen Aus-

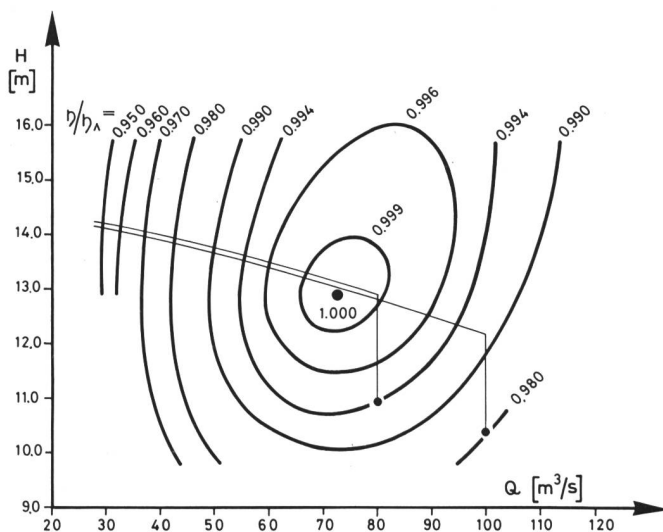


Bild 7.3-6. Wirkungsgrad-Muscheldiagramm für den gesamten Fallhöhen- und Wasserstrombereich.

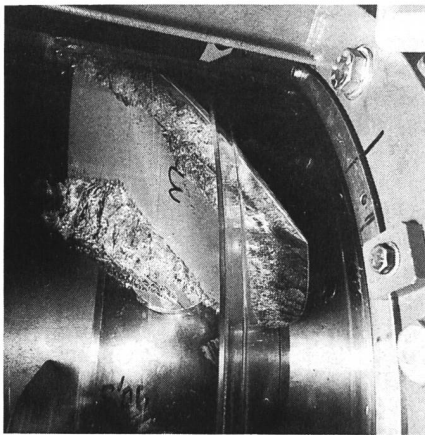


Bild 7.3-7. Kaplan-Laufradschaufel mit stark kavitierender Strömung.

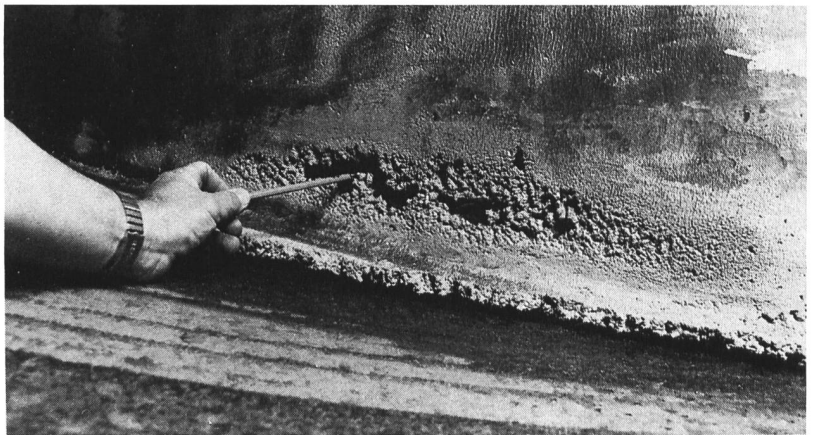


Bild 7.3-9. Kaplan-Laufrad mit Kavitationsschäden.

legung betrugen zirka 0,05 mm. Angesichts der komplizierten Formgebung der Schaufeln sind diese Abweichungen sehr gering. Bild 7.3-4 zeigt das im Prüfstand des IMHEF eingebaute Modell.

### Versuchsergebnisse

Die Modellturbine wurde bei der Versuchsanstalt Aströ in Graz hergestellt, wo auch die Entwicklungsversuche von Sulzer-Escher Wyss AG durchgeführt wurden. Die offiziellen Abnahmeversuche fanden anschliessend in Anwesenheit von Vertretern des Elektrizitätswerks der Stadt Bern und der Firmen Ingenieurunternehmung AG Bern und Sulzer-Escher Wyss AG, Zürich, in Lausanne statt.

Das Versuchsprogramm umfasste die Ermittlung des Wirkungsgrades, der Leistung und der Kavitationskennlinien sowie die Beobachtung des Kavitationsverhaltens. Die Modellresultate wurden dann auf Anlagebedingungen umgerechnet und mit den Garantiewerten des Herstellers verglichen.

Bild 7.3-5 zeigt typische Messresultate für den Verlauf des Wirkungsgrades in Funktion des Wasserstroms bei konstanter Fallhöhe ( $H = 12,87$  m). Für fünf verschiedene konstante Laufradöffnungen wurde jeweils der Leitschaufelwinkel variiert. Dies ergibt fünf sogenannte «Propellerkurven». Deren Umhüllende stellt die Betriebscharakteristik des Kaplan-Laufrades dar, die in jedem Betriebspunkt den Zusammenhang zwischen Leitrad- und Laufrad-Schaufelwinkel definiert.

Aus diesem Bild geht hervor, dass die doppelt regulierte Kaplanmaschine ein viel günstigeres Betriebsverhalten (die Charakteristik ist viel flacher) aufweist als die einfach regulierte Propellermaschine (Laufschaukelstellung fest). Wiederholt man diese Messungen für verschiedene Fallhöhen, lässt sich daraus ein «Muscheldiagramm» ableiten. Daraus kann der optimale Wirkungsgrad als Funktion der Fallhöhe

und des Wasserstroms entnommen werden (Bild 7.3-6). Die Werte der Versuchsparameter waren folgende:

Spezifische hydraulische

Energie:  $E = 68,5 \text{ J/kg}$  ( $H = 7 \text{ m}$ )

Wasserstrom:  $Q = 0,2 \text{ bis } 0,75 \text{ m}^3/\text{s}$

Drehzahl:  $n = 1100 \text{ bis } 1400 \text{ U/min}$

Bei den Kavitationsversuchen wird ein bestimmter Betriebspunkt (Fallhöhe, Wasserstrom und konstante Drehzahl) eingestellt, und es wird der Luftdruck über der freien Wasseroberfläche im Unterwassertank variiert, so dass sich auch der (vorher definierte)  $\sigma$ -Wert entsprechend verändert. Bei abnehmendem  $\sigma$ -Wert setzt ab einem gewissen Grenzwert Dampfblasenbildung ein (Bild 7.3-7). Die Dampfblasenzone wächst an und verursacht schliesslich eine zunehmende Verschlechterung des Wirkungsgrades, wie dies auf Bild 7.3-8 ersichtlich ist.

Die visuelle Beobachtung des Kavitationsphänomens ist wichtig für die Abschätzung von möglichen Kavitationsschäden der Grossausführung. An Stellen, wo der Druck längs dem Schaufelprofil zunimmt, verschwinden die Dampfblasen durch heftige Implosion, was zu lokal starken Druckwellen führt. Diese können Mikrorisse im Schaufelmaterial verursachen, die im Laufe der Zeit zu mehr oder weniger tief erodierten Stellen anwachsen (Bild 7.3-9).

Mit der Modellturbine Felsenau wurden in 12 Betriebspunkten Kavitationsversuche durchgeführt. Damit wurde ein guter Überblick über das Verhalten der Turbine im gesamten Betriebsgebiet erhalten.

Zusammenfassend haben die Abnahmeversuche mit der Modellturbine Felsenau folgendes gezeigt:

- Die vom Hersteller angegebenen Garantiewerte für Wirkungsgrad und Leistung wurden erreicht.
- Das Kavitationsverhalten erscheint als durchaus annehmbar, so dass keine grossen Kavitationsschäden an der Grossausführung zu erwarten sind.

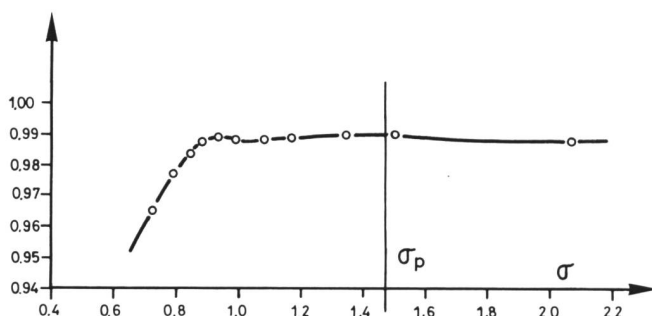


Bild 7.3-8. Wirkungsgrad als Funktion der Thoma-Kavitationszahl  $\sigma$ .

### Literatur

- [1] Bovet, Th. et Henry, P.: Le nouveau stand d'essai universel pour machines hydrauliques à réaction (Publication No 6 de l'IMH).
- [2] Henry, P.: Hydraulic machines model acceptance tests, Las Vegas, Proceedings of Waterpower 1985.
- [3] Henry, P.: Determination of turbine efficiency based on a model test. Proceedings of the ASCE Symposium of Model Prototype Correlation of Hydraulic Structures. Colorado Springs 1988.

Adresse des Verfassers: Professor Pierre Henry, dipl. Ing. EPFL, SIA, Institut de Machines Hydrauliques et de Mécanique des Fluides, IMHEF, EPF Lausanne, CH-1015 Lausanne.

## 8. Die elektromechanische Ausrüstung

### 8.1 Die Rohrturbine

Felix Fischer

*Es werden Entwicklung, Auslegung und Besonderheiten der Turbine beschrieben und anschliessend Konstruktionsprinzipien verschiedener Bauteile aufgezeigt.*

**Résumé: La turbine-bulbe**

*Description du développement, du dimensionnement et des particularités de la turbine-bulbe, suivie de remarques et éclaircissements concernant certains détails des différentes parties de la turbine.*

**Summary: The bulb turbine**

*Development, design and special features of the bulb turbine are described, followed by an explanation of the basic design principles of some specific turbine components.*

#### Einleitung

Im Frühjahr 1984 betraute das Elektrizitätswerk der Stadt Bern Sulzer-Escher Wyss mit der Konstruktion, Herstellung und der Montage einer Rohrturbine für das Kraftwerk Felsenau (Bild 8.1–1). Die neue Maschinengruppe ersetzt die seinerzeit ebenfalls durch Escher Wyss gelieferten fünf Francisturbinengruppen. Der Bestellung vorangegangen waren Vorstudien in Zusammenarbeit mit dem Elektrizitätswerk der Stadt Bern und dessen projektierenden Ingenieur, der Ingenieurunternehmung AG Bern, zu den Fragen der Maschinenwahl, der Ausbaugrösse, der Gestaltung des Zulaufs und des Schwallbeckens. Zur Optimierung dieses

Komplexes wurden an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH in Zürich Modellversuche durchgeführt (Kapitel 7.2).

#### Auslegung der Turbine

Folgende technischen Daten wurden der Turbine zugrunde gelegt:

Nettofallhöhe	10,92	12,87	14,07	m
Wasserstrom	80	80	36	m <sup>3</sup> /s
Leistung	8,12	9,6	4,55	MW
Nennndrehzahl		150		min <sup>-1</sup>

Bei sehr geringer Wasserführung der Aare muss der Betrieb der Turbine bei einem minimalen Wasserstrom von 25 m<sup>3</sup>/s noch gewährleistet sein.

Ebenso war die Turbine für einen Überlastbetrieb zu konzipieren. Aus diesem resultierte eine maximale Turbinenleistung von 11,91 MW.

Die Turbine wurde sowohl mit Laufrad- als auch Leitapparatregulierung ausgeführt.

Zur Optimierung der Turbinencharakteristiken führte Sulzer-Escher Wyss theoretische Studien und Strömungsrechnungen sowie Modellversuche durch.

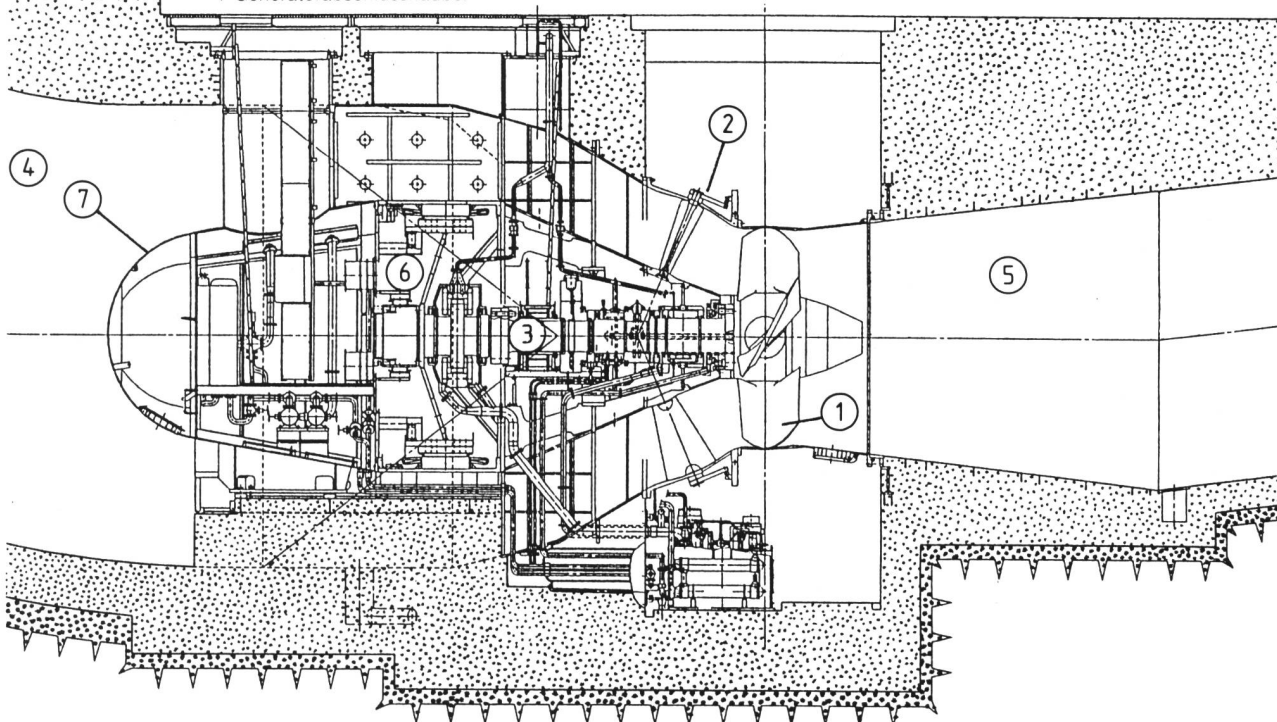
Die vertraglichen Garantiewerte wurden dann an einem komplett homologen Turbinenmodell am Institut des Machines Hydrauliques an der Eidg. Technischen Hochschule in Lausanne nachgewiesen (siehe Kapitel 7.3).

#### Besonderheiten

Im Falle eines Netzzusammenbruchs in der Stadt Bern muss die Maschinengruppe Felsenau in der Lage sein, zusammen mit der Dampfturbinengruppe des Fernheizwerks zur Versorgung ausgewählter Verbraucher einen Betrieb in einem isolierten Netz aufzubauen.

Diese Forderung führte zur Ausführung eines erhöhten Schwungmomentes der Maschinengruppe, das heisst des Generatorrotors und damit zu einem vergrösserten Tor-

Bild 8.1–1. Schnitt durch die Maschine. 1 Laufrad, 2 Leitapparat, 3 Turbinenwelle, 4 Einlauf, 5 Saugrohr, 6 Generator, 7 Generatorabschlusshaube.



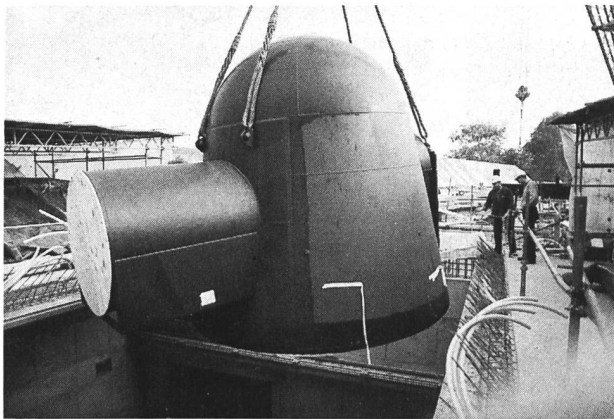


Bild 8.1–2. Einbringen der Generatorabschlusshaube mit dem Autokran in die Zentrale. Links der spätere Einstiegschacht.

pedo-Durchmesser als üblich. Besonderer Wert war zu legen auf eine zuverlässige, betriebssichere und servicefreundliche Konstruktion, um Betriebsunterbrüche anlässlich von Wartungs- und Revisionsarbeiten zu minimieren, da allfällige Stillstandszeiten in einem Kraftwerk mit nur einer installierten Maschinengruppe stets zu Produktionseinbussen führen.

### Liefergrenzen

Die Ausschreibung ordnete die Lieferung des Axiallagers sowie des generatorseitigen Radiallagers dem Generator zu. In der Folge wurde auch die Lieferung der Schmierölversorgung der gesamten Maschinengruppe dem Generatorlieferanten übertragen (siehe Kapitel 8.2).

Die Abschlusshaube des Generators (ohne deren Einbauten), welche Teil der hydraulischen Kontur der Maschinengruppe bildet, gehörte zur Lieferung der Turbine (Bild 8.1–2).

## Konstruktion

### Laufrad

Die vier Laufradschaufeln in Chrom-Nickelstahl 13/4 wurden einschliesslich Schaufelzapfen in einem Stück gegossen. Die formgebende Bearbeitung des Schaufelblattes erfolgte auf einem Fünfkordinaten-Fräswerk. Die hydraulischen Formen der Schaufeln weisen daher eine genaue, untereinander nicht abweichende Geometrie auf. Mit Hilfe dieser computerintegrierten Fertigung [1] werden ebenfalls die Laufradschaufeln der Modellturbine hergestellt, so dass die geometrische Ähnlichkeit zwischen Modell und Grossausführung gewährleistet ist. Durch das abschliessende Schleifen der Schaufeln wird deren Geometrie nicht mehr verändert, sondern nur noch die Rauheit der Oberfläche.

Der gesamte Reguliermechanismus der Laufradschaufeln ist in der Laufradnabe untergebracht. Vom beweglichen Servomotorzylinder wirken die Kräfte über Laschen auf die Hebel (Bild 8.1–4).

Das gesamte Laufrad (Nabe und Abschlusshaube) ist mit Öl gefüllt. Die Ölfüllung wird auch im Stillstand der Maschinengruppe aufrechterhalten und weist einen leichten Überdruck gegenüber dem umgebenden Wasserdruck auf.

### Turbinenwelle

Wegen der Einführung des Regulieröls zur Schaufelverstellung ist die Turbinenwelle als Hohlwelle ausgebildet. Das Regulieröl tritt mittels eines Gleittrings in die Hohlwelle. Dadurch kann auf eine durchgehende Hohlwelle verzichtet werden, und es müssen im Generatorraum (Kalotte) keine Ölleitungen installiert werden.

Reibschlusskupplungen zwischen Laufrad und Welle sowie Welle und Generator dienen der Übertragung des Antriebsmomentes [2]. Die Kupplungsschrauben sind mittels Hydraulikaggregat auf die vorgeschriebenen Dehnungswerte vorgespannt.

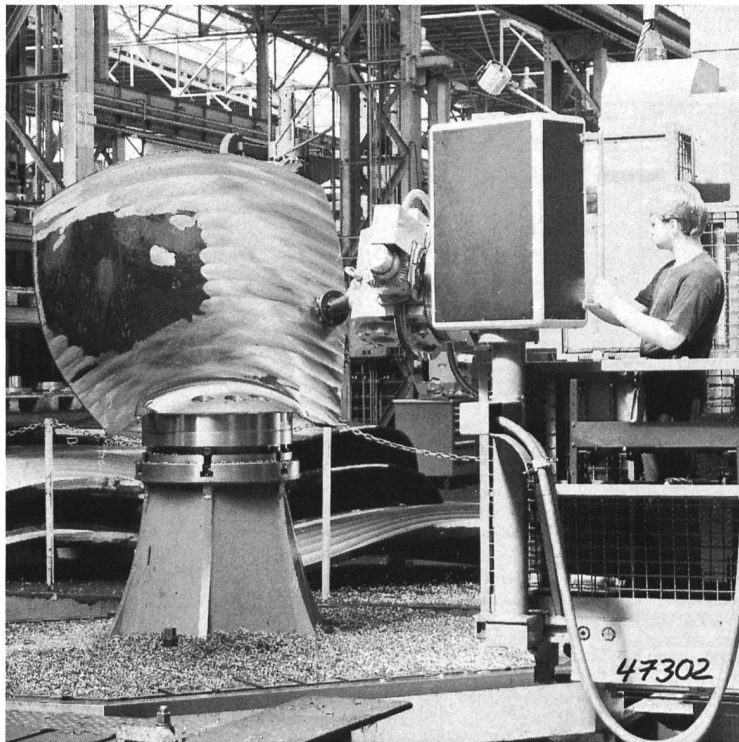


Bild 8.1–3. Fräsen der hydraulischen Form einer Laufradschaufel auf Fünfkordinaten-Fräswerk. Nach dem gleichen Programm werden auch die Schaufeln für die Modellturbine bearbeitet.

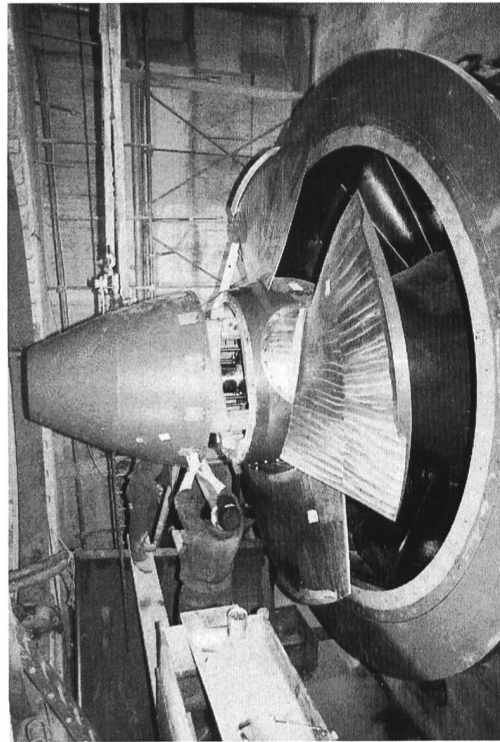


Bild 8.1–4. Abschluss der Laufradmontage. Aufsetzen der Abschlusshaube über Laufradservomotor und Verstellmechanismus.

## Wellendichtung

Als Stopfbüchse wurde eine Lippendichtung eingebaut, die als Gegenlaufläche Keramikplatten aufweist. Als Kühl- und Schmiermittel der Lippendichtung dient Betriebswasser. Dank dieser Konstruktion kann auf die Zuführung von aufbereitetem Sperrwasser verzichtet werden. Die überwachte Leckwassermenge dient der Beurteilung der Funktion der Dichtung. Eine mechanisch bedienbare Stillstandsichtung erlaubt die Auswechslung der Lippendichtung ohne Trockenlegung der Turbine. Diese Art der Wellendichtung wurde bereits in zahlreichen Rohrturbinen mit gutem Erfolg angewandt.

## Lagerung

Das lauftradseitige Radiallager ist als Schalenlager ausgeführt. Während des Anfahr- und Abstellvorgangs wird zum leichten Abheben der Welle Hochdrucköl injiziert. Die übrigen Lager sowie die Schmierölversorgung gehörten nicht zum Lieferumfang der Turbine.

## Leitapparat

Sowohl Leitradmantel als auch der unmittelbar auf dessen Flansch gelagerte Reguliererring wurden einteilig gefertigt. Für die Montage sind deshalb die inneren Lagerzapfen an den Leitschaufeln festgeschraubt.

Im Reguliermechanismus wurde jede zweite Leitschaukel mit einem hydraulischen Lenker zwischen Hebel und Reguliererring ausgerüstet. Falls sich während eines Schliessvorgangs Fremdkörper zwischen zwei Leitschaufeln festsetzen, wird Öl aus dem Lenker gepresst und über ein Druckbegrenzungsventil abgeleitet. Während des nachfolgenden Öffnungsvorgangs nimmt die Leitschaukel die synchrone Stellung im Verband wieder ein, und der Fremdkörper wird weggespült. Es entsteht somit keinerlei Betriebsunterbruch durch Arbeiten wie Auswechseln von Bruchbolzen oder Knicklenkern. Alle Leitschaukelager sowie die Lager des Reguliermechanismus sind wartungsfrei.

## Laufradmantel

Im Bereich der Laufradschaufeln besteht der Laufradmantel im gesamten Umfang aus nichtrostendem Stahl. Die obere Hälfte des Mantels kann für die Montage und allfällige Revisionsarbeiten demontiert werden.

## Rohrgehäuse

Das Rohrgehäuse dient einerseits der Wasserführung und andererseits der Einleitung der Maschinenkräfte in das Bauwerk. Es wurde als einteilige Schweisskonstruktion ausgeführt. Die obere Stützkonstruktion dient gleichzeitig als Einstieg zum Turbinenraum.

## Generatorhaube

Die Abschlusshaube mit Einstiegschacht ist auf dem Fundament gleitend abgestützt und mit dem Generatorstator verbunden.

Zur Ableitung der nicht genutzten Abwärme aus Generator- und Schmierölkühlung wurde in die Kalotte ein Spaltkühler integriert zur direkten Kühlung durch das Flusswasser. Das Kühlwassersystem der Maschinengruppe liess sich somit als geschlossener Kreislauf ausführen. Eine Verschmutzung der Kühler ist nicht zu befürchten. Ein Inspektionsausstieg ermöglicht die Kontrolle des Einlaufs zwischen Einlaufschütze und Leitapparat.

## Regleinrichtung

Die Maschinengruppe wird ferngesteuert und fernreguliert. Die erweiterten Anforderungen an den Regler, wie Betrieb

in einem isolierten Netz, Steuerung der Schwallentlastung des Schwallbeckens, empfahlen die Verwendung eines elektronischen Turbinenreglers. Gewählt wurde das digitale Turbinenleitgerät (DTL), eine Eigenentwicklung von Sulzer-Escher Wyss.

Das Gerät erlaubt eine Funktionsblockprogrammierung ohne Kenntnis der Programmiersprache mit einem anschliessbaren Terminal. Es können dadurch Anpassungen der Reglercharakteristiken eingegeben werden ohne Eingriffe in die Hardware, die sich aus Betriebserfahrungen oder aus geänderten Anforderungen ergeben.

Das Elektrizitätswerk der Stadt Bern war einer der ersten Besteller des DTL. Es bestellte zum Zeitpunkt, als erst ein Prototyp in Erprobung war. Die erfolgreiche Inbetriebsetzung des DTL hat nun die damalige Wahl bestätigt.

Eine zusätzliche elektronische Handsteuerung, die kontinuierlich nachgeführt wird, führt im Falle einer Störung des DTL-Systems bei Netzbetrieb den Betrieb unterbruchslos weiter. Vom zuletzt gefahrenen Betriebspunkt abweichende Bedingungen sind von Hand einzugeben.

Die Druckölversorgung für die Regulierbewegungen von Laufrad und Leitapparat wird mittels geregelten Pumpen erbracht. Diese werden so gesteuert, dass die Fördermenge jederzeit der erforderlichen Regulierölmenge entspricht. Neben einem sparsamen Verbrauch von Hilfsenergie resultiert auch eine längere Lebensdauer des Hydrauliköls.

Neben den üblichen Überwachungs- und Sicherungseinrichtungen wurde ein mechanisch-hydraulisch wirkendes Überdrehzahlpendel eingebaut. Bei Ausfall der Drehzahlregulierung wird durch ein Ventil der Leitapparat servomotor auf Ablauf gesteuert, und das Schliessgewicht schliesst den Leitapparat sicher.

## Montage

Da im Kraftwerk auf die Erstellung eines Portalkrans im Freien verzichtet wurde, waren alle schweren Teile mit Hilfe eines Autokrans in die Zentrale einzubringen. Das schwerste durch Sulzer-Escher Wyss angelieferte Bauteil war der im Herstellerwerk in Zürich vollständig montierte Leitapparat mit einem Gesamtgewicht von rund 50 t (Bild 8.1–5). Für die Lieferung des Laufrades, des Rohrgehäuses und der Generatorabschlusshaube waren weitere Schwerlasttransporte nötig.

## Inbetriebsetzung und Abnahmemessungen

Dank allseits guter Zusammenarbeit konnten die Inbetriebsetzungsarbeiten erfolgreich abgewickelt werden, wie überhaupt das positive Arbeitsverhältnis und die kompetente Leitung durch das Elektrizitätswerk der Stadt Bern und die Ingenieurunternehmung AG Bern während der gesamten Abwicklung erwähnt werden darf.

Die Grossausführung wurde nach den SEV-Regeln abgenommen. Sowohl die Modellabnahmeversuche als auch die Messungen an der Grossausführung erbrachten den Nachweis, dass die vertraglichen Garantien erfüllt sind. Ferner wurde eine gute Übereinstimmung zwischen Modell- und Grossausführungswerten festgestellt. Der Turbine wird allseits ein zufriedenstellendes Betriebsverhalten attestiert.

## Literatur

[1] H. Grein, F. Schneebeli, H. Bantli: Die Modellierung dreidimensionaler Flächen, ein Werkzeug für Entwicklung und Fertigung hydraulischer Maschinen.

[2] M. Staehle, M. Schuch, U. Theiler: Reibschlüssige Laufrad-Wellen-Kupplungen für Wasserkraftmaschinen.

Adresse des Verfassers: Felix Fischer, Ing. HTL, Sulzer-Escher Wyss, CH-8023 Zürich.

## 8.2 Generator und Nebenanlagen

Josef Schwanda, Walter Stauffer, Rolf Schäffer,  
Hubert Mächler

### Zusammenfassung

Beim Umbau der Zentrale Felsenau wurde eine Rohrturbine eingebaut, die einen wesentlich besseren Wirkungsgrad aufweist als die alten Turbinengeneratorgruppen. Der verwendete Generator hat bei einer Nenndrehzahl von 150 U/min eine Nennleistung von 13000 kVA ( $\cos\varphi=0,85$ ). Um einen Inselbetrieb und das Anfahren bei Netzausfall zu ermöglichen, werden alle wichtigen Hilfsbetriebe durch eine unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlage mit Gleichstromzwischenkreis und Wechselrichter gespeist.

### Résumé: Le générateur et les installations secondaires

Lors de la transformation de la centrale de la Felsenau, les anciennes machines hydroélectriques ont été remplacées par une turbine-bulbe qui possède un rendement bien meilleur. Le générateur fournit une puissance nominale de 13000 kVA ( $\cos\varphi=0,85$ ) à une vitesse nominale de rotation de 150 t/min.

Afin de permettre la mise en marche à réseau manquant et le service en île du groupe hydroélectrique, les services auxiliaires les plus importants sont alimentés par une alimentation sans coupure possédant un circuit intermédiaire à courant continu et un onduleur.

### Summary: The generator and the extension plants

By the reconstruction of the power plant Felsenau the old turbine-generators were replaced by a new more efficient bulb-turbine. The new generator furnishes a nominal power of 13000 kVA (at  $\cos\varphi=0.85$ ) at a nominal speed of 150 t/min.

In order to allow an insular service and the start of the machine at mains failure, all auxiliary services are supplied by a break-free power supply with an intermediate DC-circuit and an inverter.

### Anordnung von Generator und Turbine

Rohrturbinen eignen sich für Umbauten von Flusskraftwerken, wie z. B. Felsenau, wo mehrere kleine Maschinen durch eine grosse Maschine mit wesentlich besserem Wirkungsgrad ersetzt werden. Der gesamte Strömungskörper, bestehend aus – in Fliessrichtung gesehen – Kalotte, Generator und Turbine, wird von einer trapezförmigen Vertikalstütze und einer Kalottenauflage mit axialer Gleitmöglichkeit getragen.

Das Abstützsystem ist so berechnet, dass es Gewicht und Auftrieb, Drehmomente sowie Wärmedehnungen aufnehmen kann. Schwingungsrechnungen garantieren, dass unliebsame Vibrationen nicht auftreten.

Turbine und Generator bilden eine Einheit. In der Kalotte, die als Strömungskörper ausgebildet ist, sind die Generatorkühlung und die Heizwärmetauscher für die Kraftwerkheizung untergebracht. Durch den Einstiegschacht, durch den auch die Stromableitungen und Steuerleitungen geführt werden, ist der Generatorraum zugänglich.

Der Generator bildet den mittleren Teil des Strömungskörpers. Der Stator verbindet das Turbinengehäuse mit der Kalotte. Der Tragstern, in dem sich das Lager befindet, ist am Turbinenkonus aufgeschraubt und trägt den Rotor. Die horizontal liegende Welle ist zweifach gelagert. An deren einem Ende ist der Generatorrotor, am anderen Ende der Turbinenrotor aufgesetzt.

### Generator

Die Hauptdaten zum Generator sind in Tabelle 8.2–1 zusammengestellt.

### Gehäuse

Das einteilige Statorgehäuse bildet den mittleren Teil des Strömungskörpers. Das Rohrgehäuse ist auf der einen Seite am Turbinenkonus angeflanscht und auf der anderen Seite mit der Kalotte verschraubt. Das Drehmoment wird durch hydraulisch vorgespannte Schrauben vom Stator reibschlüssig in den Turbinenkonus und von dort ins Fundament eingeleitet. Eine Stützplatte, auf welcher der Erregerstator, die Ventilatoren und die Bremszylinder montiert sind, hält an der Verbindungsstelle Kalotte–Stator das

Tabelle 8.2–1. Technische Daten des Generators Felsenau

Dreiphasen-Synchron-Generator	Typ WAR 419–82-40
Nennleistung bei $\cos\varphi = 0,85$	13000 kVA
Leistungsaufnahme bei Nenndaten	ca. 11450 kW
Nennspannung, verkettet	5000 V
Betriebsspannung, verkettet	5000 V $\pm 5\%$
Nennstrom	1501 A
Nennfrequenz	50 Hz
Nenndrehzahl	150 U/min
Durchgangsdrehzahl (2 min)	490 U/min
Schwingmoment ( $GD^2$ )	370 t/m <sup>2</sup>
Erregerspannung	145 V
Erregerstrom	739 A
Einige Dimensionen:	
Stator Aussendurchmesser	4700 mm
Stator Montagegewicht	45 t
Rotor Montagegewicht mit Lagerstern	43 t

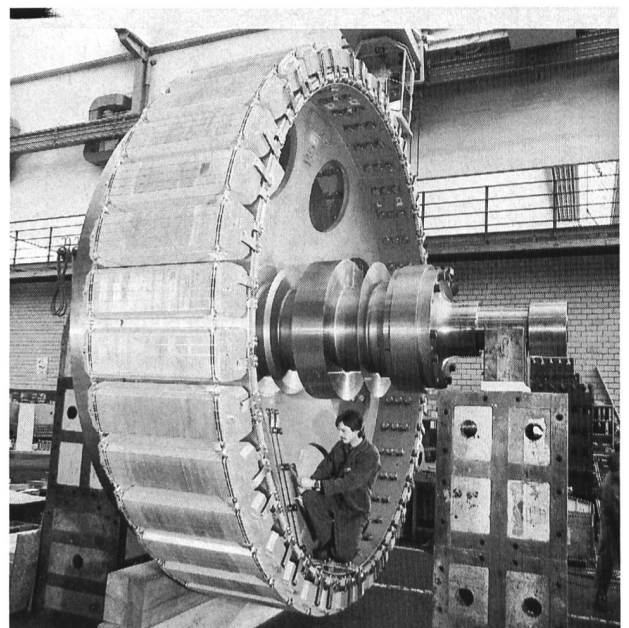


Bild 8.2–1. Werkansicht des Generator-Polrades. Zu erkennen sind die 40 Pole, die Polverbindungen sowie die Auflageflächen des kombinierten Radial- und Führungslagers.

Rohrgehäuse rund. Bei der Konstruktion wurde grosser Wert auf Servicefreundlichkeit gelegt.

### Blechpaket

Das Blechpaket besteht aus verlustarmen, gegeneinander verschichteten, isolierten Dynamoblechen. Die Bleche sind zusätzlich mit einem Klebelack beschichtet und werden nach dem Einblechen unter Wärme und Druck miteinander verklebt. Dabei wird darauf geachtet, dass sie am Statorgehäusemantel anliegen. Der geblechte Ring wird zusätzlich axial mit vorgespannten Pressfingern zusammengehalten und ist, radial über Schwalbenschwanzkeile, mit dem Rohrgehäuse verbunden. Im Betrieb verbindet sich der warme Blechring mit dem wasserumspülten, kalten Gehäuse ring zu einem Ganzen (Bild 8.2–2).

### Wicklung

Die Wicklung ist als Zweischichtwellenwicklung ausgelegt und mit Wicklungsstäben ausgeführt. Die Wicklungsstäbe sind im eingebauten Zustand, unter Verwendung von Verbindungsstücken und Hartlötung, zu ganzen Spulen verbunden und diese wiederum durch die Wicklungsverbindungen und Ableitungen zur kompletten Dreiphasenwicklung zusammengeschaltet. Die Spulenschenkel sind mit saugfähigen Glasfaserkordeln untereinander distanziert und an die durchgehenden Kordeln befestigt, die am Umfang geschlossene Ringe bilden. Durch die Aushärtung der mit Epoxydharz imprägnierten Kordeln entsteht ein stabiler und kurzschlussfester Gewölbeverband (Wickelkopf).

### Polrad

Polradkranz, konische Nabenscheibe und Welle sind miteinander verschweisst. Der kalottenseitig verlängerte Polradkranz dient als Bremsring. Die Polkörper, auf denen die Polspulen sitzen, sind auf dem Rotorring aufgeschraubt. Die Dämpferwicklung ist als geschlossener Ring ausgebildet. Die Pole des Polrades werden von einer Drehstrom-Aussenpolmaschine mit rotierendem Anker und nachgeschaltetem Diodengleichrichter erregt. Schleifringe und Kohlenbürsten entfallen. Bei diesem Erregersystem gibt es also keinen Verschleiss durch Abrieb von Kohlenbürsten (Bild 8.2–3).

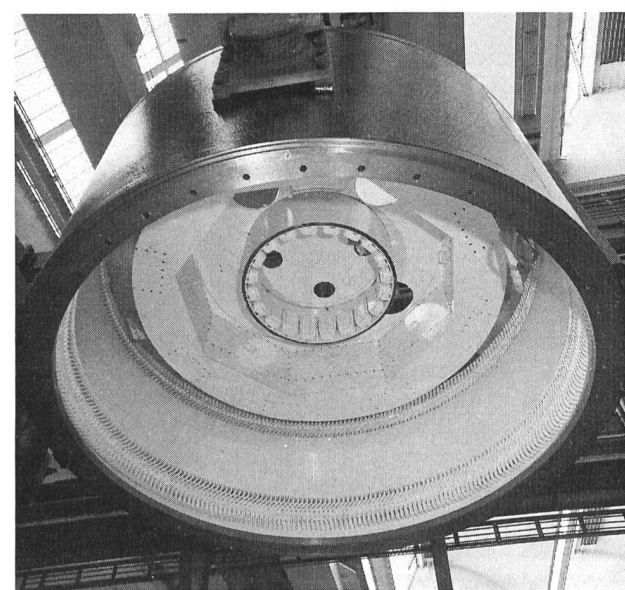


Bild 8.2–2. Werkaufnahme des fertig gewickelten Generator- und Erreger-Stators, wie er am Kran hängt (45 t). Innenansicht von Turbinenseite. Zu erkennen sind die Wickelköpfe der Statorstäbe und die Polspulen der Erregerwicklung. Der Stator-Aussendurchmesser beträgt 4700 mm.

### Das Lager

Das Radiallager beim Turbinenrad wurde zusammen mit der Turbine von Sulzer-Escher Wyss geliefert. Das kombinierte Axial/Radiallager beim Generatorrotor wurde von ABB geliefert. Da dieses nahe bei der Rotorschwerachse liegt, sind die Wellendehnbiegung und die Schrägstellung – konstanter Luftspalt – des freiliegend angeordneten Polrades minimal. Das kombinierte Axial/Radiallager ist in einem stabilen Tragstern eingebaut, der direkt am Turbinengehäuse angeflanscht ist.

Axial- und Radiallager sind als Gleitlager und mit Kippsegmenten ausgeführt, d. h. die Segmente sind beweglich gelagert. Die Lagersegmente sind aus Stahl gefertigt und mit einer Gleitschicht aus Weissmetall versehen.

Die Radiallagersegmente sind über Keile auf dem Lagerkörper-Innendurchmesser abgestützt. Die einstellbaren Segmente ermöglichen eine exakte Feineinstellung des Rotors in der Statorbohrung und somit einen konzentrischen Luftspalt. Die axiale und radiale Steifigkeit von Lager und Tragstern sowie die rotierenden Massen beim Generatorrotor tragen massgeblich zur Laufruhe eines Generators bei, da diese ein zusammenhängendes Schwingungssystem bilden.

### Schmierung

Die Lager arbeiten nach dem Prinzip der hydrodynamischen Schmierung (Vollschmierung). Die Reibflächen sind infolge des selbst erzeugten Drucks vollständig getrennt. Die Lager werden durch eine externe Schmierölaufbereitungsanlage (mit Hochtank) mit Öl versorgt.

Das Lager ist bei Stillstand der Maschine ölfrei. Daher muss vor dem Start der Maschine die Ölumlaufschmierung in Gang gesetzt werden. Diese versorgt die Lagersegmente einzeln mit Schmieröl. Die Feinverteilung des Schmieröls auf die Segmente erfolgt durch ein Leitungssystem im Inneren des Lagerkörpers. Die vier untenliegenden Radiallagersegmente sind für Druckölschmierung ausgerüstet und an ein Drucköl-Schmiersystem (Hochdruckschmierung) angeschlossen.

### Kühlluft- und Kühlwassersystem

Die Maschine ist, mit Ausnahme der Lager, vollständig luftgekühlt. Die Kühlluft wird durch Fremdventilatoren in einem geschlossenen Kreislauf in der Maschine umgewälzt. In einem zweiten Kreislauf wird Kühlwasser von den Luft/Wasser-Kühlern mittels Pumpen durch den «Spaltkühler» gefördert. Als Spaltkühler wird die doppelwandige Ausbildung der Kalottenaussenwand bezeichnet, von wo grossflächig die Verlustwärme ans Flusswasser abgegeben wird (Bild 8.2–4).

### Schmierölversorgungsanlage

#### Lieferungsumfang und Auslegung

Das radiale Führungslager der Turbine und das kombinierte radiale Führungs- und axiale Drucklager auf der Generatortorseite werden durch eine Schmieröl-anlage versorgt, die auf Basis folgender Lagerdaten ausgelegt wurde:

		Turbinen-lager	Generator-lager
Lagerverluste	kW	10	40
Ölmenge	l/min	35	175
Öldruck	bar	6	6

Die Anlage besteht im wesentlichen aus (Bild 8.2–5):

- einem Schmieröltank mit 3000 l Inhalt, der im Laufradschacht unmittelbar unter dem Turbinenleitapparat platziert ist,
- einem Hochtank mit 1000 l Inhalt, der in einem Nebenraum ausserhalb der Maschinenhalle auf Deckenhöhe aufgestellt ist,
- einem Magnetventil, das in der Maschinenhalle in der Speiseleitung zum Hochtank eingebaut ist.

In der Auslegung wurden auch folgende Betriebsbedingungen berücksichtigt:

- Im Stillstand schwindet, infolge der beträchtlichen Gewichte von Welle, Generatorrotor und Turbinenlaufrad, der Ölfilm in den Lagersegmenten. Um einen einwandfreien, reibungslosen Anlauf zu gewähren, werden die unteren Radialsegmente mit einer Hochdruckpumpe gespeist und damit ein Ölfilm zwischen Lagersegment und Wellenauflfläche gepresst.
- Durch den im Betrieb ständig gefüllten Ölhochtank kann ein einwandfreies Auslaufen der Turbinengeneratorgruppe ohne Lagerschäden, auch bei einem Stromausfall, garantiert werden.

### Betrieb der Anlage

Bei Stillstand der Turbinengeneratorgruppe befindet sich die gesamte Ölmenge im Schmieröltank. Sie wird durch eine temperaturgesteuerte Stillstandheizung auf etwa 40°C betriebsbereit gehalten. Soll die Turbinengeneratorgruppe angefahren werden, geht zuerst die 6-Zylinder-Hochdruckpumpe in Betrieb. Vier Kolben speisen die unteren und seitlichen Generatorlagersegmente, die übrigen zwei das Turbinentaschenlager. Beim Anfahren bleibt die Hochdruckpumpe in Betrieb, bis die Turbinengeneratorgruppe 90% ihrer Drehzahl erreicht hat. Desgleichen wird sie beim Stilllegen zugeschaltet, sobald die Drehzahl der Gruppe unter 90% sinkt. Gleichzeitig mit der Hochdruckpumpe tritt beim Anfahren der Turbinengeneratorgruppe die normale Ölversorgung in Betrieb. Die beiden Ölpumpen speisen gleichzeitig die Generator- und Turbinenlager sowie den Hochtank. Das Öl durchfliesst den Automatikfilter, den Heizwasser-Wärmetauscher und den Ölkühler und gelangt direkt

durch den Turbinenschacht zum Generator- und zum Turbinenlager. Die Ölzufuhr ist durch je einen Strömungswächter überwacht. Das Öl durchströmt die Lager und gelangt durch eine Sammelleitung wieder zum Schmieröltank. Via Abzweigung fliesst das überschüssige Öl zum Hochtank, und zwar durch das in der Anfahrphase offene Motorventil. Ist der Hochtank mit 800 l gefüllt, gibt ein entsprechender Schwimmerschalter die Freigabe zum Start der Turbine. Ein zweiter Schwimmerschalter, der eine Füllmenge von 1000 l anzeigt, dient zum Abschalten der zweiten Pumpengruppe und zum Schliessen des Motorventils. Diese Pumpe bleibt einsatzbereit, falls die sich in Betrieb befindliche Pumpe eine Störung aufweist. Das in den Lagern nicht benötigte Öl passiert die mit einer Blende versehene Bypassleitung zum geschlossenen Magnetventil, durchströmt den Hochtank und fliesst via Überlaufleitung zurück zum Schmieröltank. Bei Stillstand oder Stromausfall entleert sich der Hochtank über das parallel zum Magnetventil geschaltete Rückschlagventil. Der Wiedereintritt des Öls in den Schmieröltank bewirkt Schaum und Ölnebel. Deshalb ist der Tank durch ein schräg angeordnetes Sieb in Rücklauf- und Pumpenraum unterteilt. Der Ölrücklaufraum ist mit einem Nebelabsaugventilator versehen, der auch die Funktion hat, den nötigen Unterdruck in den Ölabbstreifkammern des Generatorlagers zu erwirken. Die Anlage wird durch Mess- und Überwachungselemente ergänzt.

### Kühl- und Heizanlage

#### Konzept und Aufbau

Von den Wärmequellen wird die Abwärme über Wärmetauscher an den Kühlkreislauf und an den Heizungskreislauf abgegeben. Wasserseitig sind die beiden Kreisläufe vollständig voneinander getrennt. Der geschlossene Kreislauf der Kühlwasseranlage enthält folgende Elemente (Tabellen 8.2–2 und 8.2–3):

- Luft/Wasser-Wärmetauscher für die Kühlluft des Generators
- Öl/Wasser-Kühler des Lagers
- Öl/Wasser-Kühler des Transformators

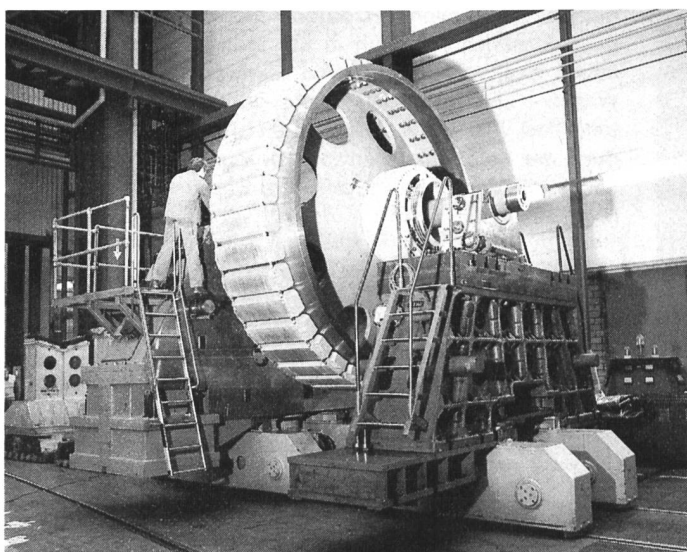


Bild 8.2–3, links. Werkansicht des Generator-Polrades mit Erregerrotor (43 t), montiert auf den Lagerböcken für die Durchführung der Schleuderprobe mit 490 U/min.

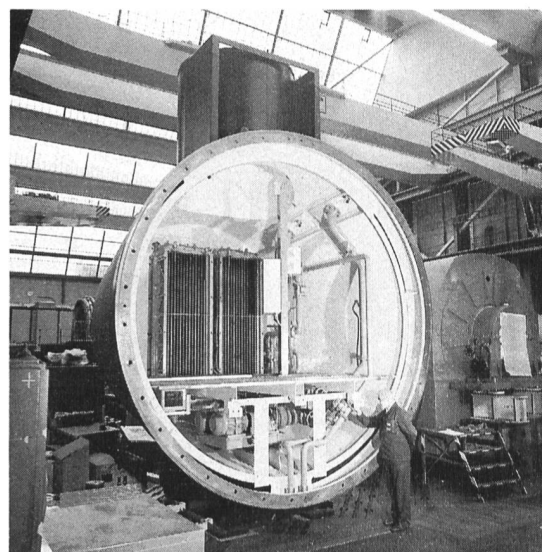


Bild 8.2–4, rechts. Werkansicht der Kalotte mit Einstiegschacht von Generatorseite aus. Zu beachten: In der linken Hälfte des Kalotteninnern die beiden Generator-Luft/Wasser-Kühler; davor rechts anschliessend die Kraft- und Messklemmenkästen. Rechts an der Wand die Rohrleitungsverbindungen zum Spaltkühler mit Dreiwegventil. Unter dem Podest mit Gitterrost ist die Pumpengruppe angeordnet.

- Luft/Wasser-Kühler des Klimageräts für den Transformatorraum

Alle diese Kühlelemente sind unter sich wasserseitig parallel geschaltet.

- Redundante Pumpengruppen
- Wasser/Wasser-Spaltkühler, integriert in die Aussenhaut der Kalotte des Maschinenraums

Der Spaltkühler garantiert die Ableitung der anfallenden Abwärme bis zu einer Flusswassertemperatur von 22°C. Beim Heizungssystem sind die Wärmetauscher von Generator, Lager und Trafo in Serie geschaltet. Örtlich sind sie den Wärmetauschern des Kühlsystems warmluftseitig vorgebaut.

### Temperaturregelung

Im Kühlwasserkreislauf teilt ein Dreiwegventil den Kühlwasserfluss auf die Wärmetauscher und einen Bypass auf. Damit wird die Betriebstemperatur des Generators und der Trafo-Aktivteile unabhängig von der Last auf einen konstanten Wert geregelt.

Im Heizkreislauf bleibt die Heizwasser-Vorlauftemperatur, als Folge der vom Kühlkreislauf auf einen annähernd konstanten Wert geregelten Lufttemperatur, ebenfalls konstant;

Tabelle 8.2–2. Kühlsystem für Generator, Lager, Transformator und Transformatorraum. Technische Daten der Luft-, Öl- und Spaltkühler.

	Generator Luftkühler	Lager Ölkühler	Trans- formator Ölkühler	Trans- formator Raumluf- kühler	Kalotten Spaltkühler
Abzuführende Verlustleistung (kW)	250	50	55	3	358
<b>Kühlwasser primärseitig</b> (geschl. Kreislauf)					
Menge (l/s)	12	2,5	3,5	0,56	17,56
Eintrittstemperatur (°C)	35	35	35	35	40
Austrittstemperatur (°C)	40	40	40	40	35
<b>Kühlwasser sekundärseitig</b> (Aaretriebwasser)					
max. Temperatur (°C)					22
<b>Kühlluft</b>					
Menge (m³/s)	10,5			0,57	
Eintrittstemperatur (°C)	62			50	
Austrittstemperatur (°C)	40			40	
<b>Kühlöl</b>					
Menge (l/s)		3,5	4,73		
Eintrittstemperatur (°C)		60	73		
Austrittstemperatur (°C)		52	66		

Tabelle 8.2–3. Wärmerückgewinnung für Heizung der Zentrale. Technische Daten der Heizwasser-Wärmetauscher.

	Heizwasser-Wärmetauscher		
	Generator Luft	Lager Öl	Transformator Öl
Heizleistung (kW)	42	42	15
<b>Heizwasser</b>			
Menge (l/s)	2,20	2,20	2,20
Eintrittstemperatur (°C)	45	50	57
Austrittstemperatur (°C)	50	57	62
<b>Kühlluft</b>			
Menge (m³/s)	10,5		
Eintrittstemperatur (°C)	62		
Austrittstemperatur (°C)	55		
<b>Kühlöl</b>			
Menge (l/s)		3,5	4,73
Eintrittstemperatur (°C)		60	73
Austrittstemperatur (°C)		53	71

dies allerdings nur, solange die anfallende Verlustleistung den Dimensionierungswert der Heizleistung übersteigt.

### Überwachung

Für die Überwachung des Kühlwassers sind Durchflusswächter mit Mengenanzeige installiert. Der Verlust durch die Stopfbüchsenabdichtung der Pumpen wird automatisch nachgespeist. Das Zusatzwasser wird konditioniert, so dass im Kühlsystem keine Härteausfällung und keine Korrosionsschäden auftreten.

### Anlage für unterbruchfreie Spannungsversorgung (USV-Anlage)

Das Kraftwerk Felsenau ist ein wichtiger Energielieferant, deshalb wurde verlangt, dass auch bei vollständigem Netzausfall im Kraftwerk die Maschinengruppe angefahren und auch im Inselbetrieb gefahren werden kann. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, sind alle wichtigen Hilfsbetriebe für das Kraftwerk an der sogenannten sicheren 380-V-50-Hz-Schiene angeschlossen, die von einer «unterbrechungsfreien Stromversorgung» gespeist wird. Die USV-Anlage enthält im wesentlichen (Tabelle 8.2–4):

- Ein *Ladegerät* für das Aufladen der Batterien nach I/U-Kennlinie (Strom/Spannungs-Kennlinie) mit Starkladung und Schwebeladung.
- Einen *Gleichstromzwischenkreis*, der die vollständige Unabhängigkeit der Ausgangsspannung und -frequenz von den Vorgängen auf der Netzseite ermöglicht. Eine Akkumulatorbatterie liefert die notwendige Energie bei Netzausfällen.
- Einen *Wechselrichter*, der die Gleichspannung kontaktlos in eine Wechselspannung konstanter Frequenz und Amplitude umformt. Durch ein ausgewogenes Schaltungskonzept und ein angepasstes Regelverfahren werden hervorragende dynamische Eigenschaften erreicht. Insbesondere ermöglicht die hohe Überlastbarkeit eine wirtschaftliche Dimensionierung der Anlage. Die geforderte Qualität der Ausgangsspannung, auch bei transienten Vorgängen, wird durch ein Filter sichergestellt.
- Die *Steuer- und Regelelektronik*, die in moderner IC-Technik (Integrated-Circuit-Technik) aufgebaut ist. Eine Gliederung in abgeschlossene Funktionseinheiten ergibt einen übersichtlichen modularen Aufbau. Die meisten Funktionen sind in Digitaltechnik realisiert. Dies ergibt eine gute Langzeitstabilität. Alle wichtigen Signale sind auf den Printfrontplatten mit Hilfe von Leuchtdioden angezeigt oder auf Messbuchsen geführt.

Ergänzende Bedienungselemente sind ebenfalls auf den Printfrontseiten untergebracht. Da diese durch eine verschlossene Türe geschützt sind, ist ein unbeabsichtigtes Betätigen oder Manipulieren durch fremde Personen ausgeschlossen.

Dank der Wahl eines geeigneten Schaltungskonzepts und der Gliederung in klare modulare Funktionseinheiten kann die Komponentenzahl der benötigten Verbindungen auch im Leistungsteil klein gehalten werden. Dies erhöht die Zuverlässigkeit des Systems.

Tabelle 8.2–4. Technische Daten der USV-Anlage

Eingangs-/Ausgangsspannung	3 × 380/220 V
Nennleistung bei geladener Batterie	220 kVA
Ausgangsleistung bei cos φ 0,8 induziert	200 kVA
Maximale Eingangsleistung bei Batteriebeladung	310 kVA
Frequenz	50 Hz
Konstanz der Ausgangsfrequenz	±0,5
Batteriekapazität	550 Ah
Betriebsspannung	410 V

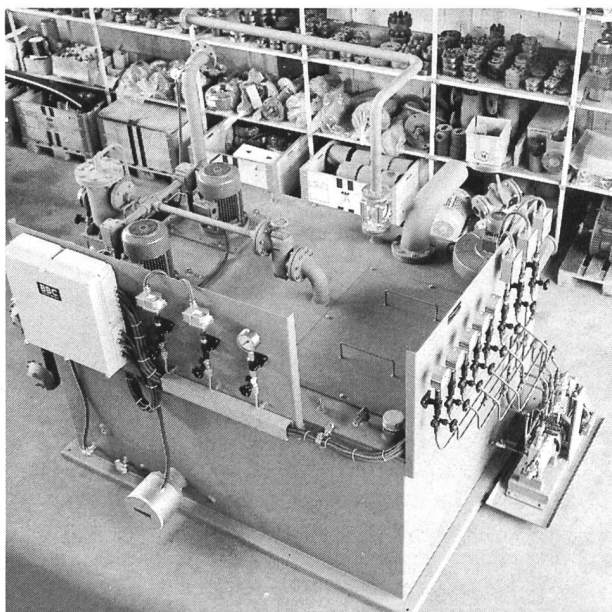


Bild 8.2–5. Werkansicht des Schmier-Öltanks mit 3000 l Inhalt. Daran angebaut sind der Automatikfilter (links hinten), die Pumpenmotoren (links oben), der Klemmenkasten (links vorne), die Stillstandsheizung (links unten), der Ölnebelabsaugventilator (rechts oben), die Hochdruckpumpe (rechts unten).

- Die *statische Netzurückschaltung*, die für die automatische unterbrechungsfreie Umschaltung der Verbraucherlast von der USV-Sammelschiene auf das Primärnetz ausgelegt ist und eine unzulässige Abweichung der Ausgangsspannung verhindert.

Die Kapazität der USV-Batterien ist so ausgelegt, dass alle Hilfsbetriebe, die für den Betrieb des Kraftwerks nötig sind, während 30 Minuten aufrechterhalten werden können.

Folgende Hilfsbetriebe sind an die unterbrechungsfreie Spannungsversorgung USV angeschlossen:

- |  |                             |
|--|-----------------------------|
| – Spannungsregler (220 V)                            | – Lagerölpumpe Turbine      |
| – Fernwirkanlage (220 V)                             | – Generator                 |
| – Laufrad-Füllpumpe                                  | – Leckwasserpumpe           |
| – Betriebspumpe                                      | – Notbeleuchtung Anlage     |
| – Drehzahllastregulierung, Öffnungsbegrenzer (220 V) | – (220 V)                   |
|  | – Grundablass               |
| – Hydraulikregulierung, Temperatur-P-Messung (220 V) | – Wasserregulierung (220 V) |
|  | – Messung (220 V)           |
| – Durchflussmessung (220 V)                          | – Generator Lagerölheizung  |
|  | – MNS-Verteilung (220 V)    |
| – Turbinen-Rechner-einheiten (220 V)                 | – Motorventil (220 V)       |
|  | – Hochtank                  |
| – Lagerentlastungspumpe                              | – Magnetventil Bremse       |
|  | – (220 V)                   |
| – Kompressor für mechanische Bremse                  |                             |

### Batterieanlage und deren Verteilung

Die Gleichrichter- und Batterieanlage besteht aus:

- $\pm 24$  V, 1200 Ah/480 Ah für die Maschinensteuerung Procontrol und Wasserregulierung Procontrol
- 48 V, 640 Ah für die Fernwirkanlagen vom Kraftwerk Felsenau nach Monbijou, Messung und Regelung
- 220 V, 210 Ah für Generatorschutz, Spannungsregler Unitrol, Synchronisierung und für die Steuerkreise der 11-kV-Anlage

Die Gleichrichteranlage mit den zugehörigen Batterien ist im bestehenden Kraftwerkgebäude untergebracht. Die

Gleichstromverteilungen sind im neuen Kraftwerk zentral zu den Verbrauchern platziert.

### Niederspannungsanlage $3 \times 380/220$ V und deren Hilfsbetriebe für den Eigenbedarf

Die Kraftwerkhilfsbetriebe  $3 \times 380/220$  V werden über zwei Eigenbedarfstrafos vom 11-kV-Netz gespeist, wovon ein Trafo parallel als «stand-by» geschaltet ist. Leistungen der Trafos 400 kVA, DY 5, 11/0,4 kV.

Für die Niederspannungsverteilung wurde das Modulare System MNS gewählt mit Einschubmodulen der Leistungsschalter, Sicherungsabgängen usw. Jedes Modul ist mit dem entsprechenden Schutzsystem, Steuerungsblock und Alarmkreis versehen für die automatische Ansteuerung der Maschinenautomatik oder mit Umschaltung auf lokale Bedienung mit der entsprechenden Signalisation für Lokal und Kommandoraum.

Die Niederspannungsverteilung für die Hilfsbetriebe befindet sich im zweiten Untergeschoss der neuen Zentrale und besteht aus sechs kompakten MNS-Feldern mit total 75 Motor- und Sicherungsabgängen.

Die Generatorhilfsbetriebe sind aus Sicherheitsgründen wie folgt aufgeteilt:

- 45 Hilfsbetriebe sind an die normale MNS-Niederspannungsverteilung angeschlossen.
- 30 Hilfsbetriebe sind an die sichere MNS-Verteilschiene angeschlossen, welche von einer 200-kVA-unterbrechungsfreien Stromversorgung gespeist wird.

Die sichere Schiene resp. deren angeschlossene Hilfsbetriebe sind so ausgelegt, dass auch bei einem kompletten Stromausfall das Kraftwerk weiterhin betrieben oder sogar als Inselkraftwerk unabhängig von der externen Stromversorgung gestartet werden kann (als black-start). Damit kann ein Inselbetrieb für die ausgewählten Versorgungsnetze gesichert werden.

Adressen der Verfasser: ABB, Asea Brown Boveri AG, CH-5401 Baden; Josef Schwanda, Sen. Engineer, Projektierung und Konstruktion, KWHT, ABB-Birr; Walter Stauffer, El.-Ing., Verkaufsingenieur, Abt. KWHV, ABB-Birr; Rolf Schäffer, Ing. SWKI, Fachleiter Kühltssysteme, IHP-P, ABB-Dättwil; Hubert Mächler, El.-Ing., Verkaufsingenieur, Abt. KWHV, ABB-Birr.



**Kraftwerk Felsenau 1989**  
**Elektrizitätswerk der Stadt Bern**

## 9. Abwärmenutzung

Walter Hirsbrunner

### Zusammenfassung

Die durch die mechanischen und elektrischen Verluste der hydroelektrischen Anlage entstehende Abwärme wird für die Beheizung der Betriebsgebäude verwendet. Dazu ist ein eigenes Leitungssystem mit eingebauten Wärmetauschern dem Kühlkreislauf der Kraftwerkanlage vorgeschaltet. Die Abwärme wird direkt den Heizungsgruppen zugeführt. Bei Spitzenbedarf deckt ein Elektrodurchlauferhitzer die fehlende Leistung.

### Résumé: L'utilisation de la chaleur perdue

Les pertes d'énergie mécaniques et électriques des installations hydro-électriques de la centrale sont récupérées et utilisées pour chauffer les bâtiments de celle-ci. Cette récupération est réalisée par un circuit indépendant avec des échangeurs de chaleur mise en série avec le circuit de re-

froidissement de la centrale. L'énergie récupérée est distribuée directement aux utilisateurs de chaleur. Si c'est nécessaire, un électro-réchauffeur fait l'appoint.

### Summary: The exploitation of waste heat

The mechanical and electrical losses of the hydro-electric installation are used to heat the buildings of the power-station. Therefore an independent circuit with integrated heat exchangers is series-connected to the cooling device of the power plant. The collected heat is distributed directly to the consumers. At maximum demand of heat an electrical flow heater furnishes the supplementary heat.

### Einleitung

Bei jeder in Betrieb stehenden hydroelektrischen Anlage fallen mechanische und elektrische Verluste in Form von Wärme an. In der alten Zentrale Felsenau mit freistehenden Generatoren wurde diese je nach Bedarf direkt zum Heizen der Maschinenhalle und der umliegenden Räume verwendet; der Überschuss gelangte durch die Entlüftungsöffnungen ins Freie.

Die neue Anlage, bei der die Turbine und der Generator als Einheit im Wasser liegend zusammengebaut sind, braucht eine Kühlung; die Abwärme muss durch ein geschlossenes System abgeführt werden. Abwärme produzieren der Generator, die Lager sowie der Transformator, der abgeschlossen in einem separaten Raum aufgestellt ist.

Aus der Zusammenstellung der Abwärmeleistungen und Temperaturen wie sie in Kapitel 8.2 aufgeführt ist, wird ersichtlich, dass eine direkte Abwärmenutzung für Heizzwecke möglich ist. Mit dieser Wärme können die Gebäude des Kraftwerks geheizt werden, ohne dass dafür viel zusätzliche Elektroenergie aufgewendet werden muss. Für die Abwärmenutzung wurde ein analoger Wasserkreislauf erstellt. Er ist dem Kühlkreislauf vorgeschaltet; die höheren Temperaturen der Abwärme erlauben eine bessere Nutzung als Heizwärme.

### Prinzip der Anlage

Aus dem Prinzipschema (Bild 9–1) wird der einfache Aufbau ersichtlich. Die Wärmetauscher der Abwärmequellen sind zueinander in Serie geschaltet. Die Generatorenkühlung (1) bildet die erste Stufe mit der niedrigsten Abwärmtemperatur. Die Temperatur des eintretenden Rücklaufwassers der Heizung wird angehoben und gelangt zum Wärmetauscher des Lagerölkühlers (2), der die zweite Temperaturstufe bildet. Von da wird in einer dritten Stufe – Trafoölkühler (3) – das Heizungswasser aufgeheizt und zu den Verbrauchergruppen geführt.

Die Wärmetauscher sind für die Winterleistung der Turbinenanlage, das heisst für die in dieser Zeit anfallende Abwärme, ausgelegt.

Im Winter ist für die Gebäudeheizung am meisten Wärme nötig; die Abwärme genügt dann nicht, um den Bedarf zu

decken. Somit tritt der Elektrodurchlauferhitzer (4) in Funktion, welcher der Abwärmenutzung nachgeschaltet ist. Dieser deckt den Rest des Leistungsbedarfs. Wenn die Vorlauftemperatur das Maximum von 62°C erreicht, beträgt die Temperatur des Rücklaufwassers 45°C. Das 45°C warme Wasser tritt dann wieder in die Generatorenkühlung ein, um den Aufheizprozess von neuem beginnen zu lassen.

### Abwärmebezüger

Angeschlossen an das Abwärmesystem sind folgende Abnehmergruppen:

Neue Zentrale:	
Warmwasseraufbereitung (6)	$Q_{\max} = 18,40 \text{ kW}$
Tropengarten (7)	$Q_{\max} = 7,40 \text{ kW}$
Maschinenhalle (8)	$Q_{\max} = 22,80 \text{ kW}$
Kommando- und Aufenthaltsräume (9)	$Q_{\max} = 23,90 \text{ kW}$
Alte Zentrale:	
Werkstatträume (10)	$Q_{\max} = 35,70 \text{ kW}$
Maschinenhalle (11)	$Q_{\max} = 20,50 \text{ kW}$
Total	$Q_{\max} = 128,70 \text{ kW}$

Die maximalen Leistungen sind ausgelegt für eine minimale Aussentemperatur von  $-8^\circ\text{C}$ .

Die Maschinenhallen werden durch vertikalblasende Lufterhitzer beheizt; diese Heizgruppen sind wasserseitig nicht reguliert, die Betriebstemperaturen entsprechen der Austrittstemperatur der Wärmeproduktion. Dagegen werden die Heizgruppen der Kommando-, Aufenthalts- und Werkstatträume in Abhängigkeit der Aussentemperatur reguliert. Die Heizkörper sind durch die thermostatischen Ventile nach der gewünschten Raumtemperatur geregelt.

Die Lüftung des Tropengartens braucht Wärme besonders auch für die Trocknung der Raumluft; sie wird hauptsächlich im Sommer gebraucht, um eine Sättigung der Luft mit Feuchtigkeit zu vermeiden.

### Wärmebilanz

Der Wärmeenergiebedarf setzt sich zusammen aus dem Bedarf für die einzelnen Heizgruppen. Die verschiedenen Wärmebedürfnisse fallen zu unterschiedlichen Zeiten an, so dass die Spitzenleistung kaum die Summe der einzelnen Leistungen erreichen wird. Somit kann die Abwärme besser und länger den ganzen Bedarf decken, als die Rechnung mit gleichzeitigem Auftreten aller Spitzenleistungen ergibt.

Der Anteil für die Heizperiode beträgt etwa 85 % des gesamten Bedarfs, der Rest wird zwischen April und Oktober für die Lüftung sowie für die Warmwasserproduktion benötigt. Bedarfsspitzen sind von Dezember bis Ende Februar zu erwarten. In dieser Zeit wird oft auch am wenigsten Strom produziert, wenn die Aare wenig Wasser führt. Dann reduziert sich die Abwärmeproduktion. Der Elektrodurchlauferhitzer ergänzt die fehlende Leistung, um den Bedarf decken zu können. Der Anteil der direkten Elektroenergie entspricht

Bild 9–1. Schema der Anordnung der Wärmetauscher.  
1 Wärmetauscherbatterien Generatorkühlung, 2 Wärmetauscher Lagerölkühler, 3 Wärmetauscher Transformatoren-Ölkühler, 4 Elektrodurchlauferhitzer, 5 Hauptumwälzpumpen, 6 Warmwasseraufbereitung, 7 Lüftung Tropengarten, 8 Luftheizung Maschinenhalle Neubau, 9 Heizung Kommando- und Aufenthaltsräume, 10 Heizung Werkstatt-räume, 11 Luftheizung Maschinenhalle Altbau, 12 Expansionsgefäß, 13 Wärmemessung.

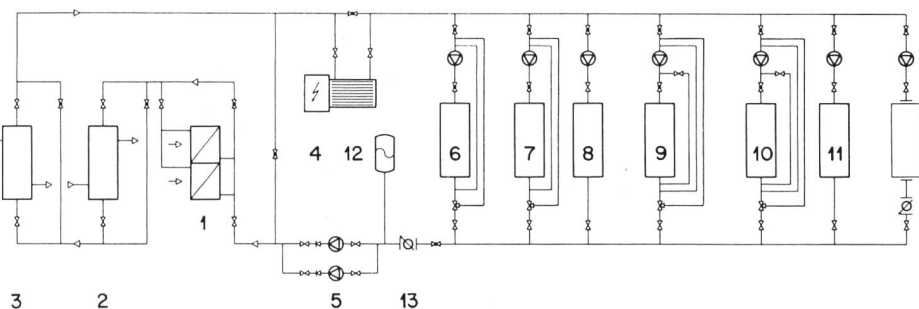


Tabelle 9 – 1. Jährlicher Wärmeumsatz.

<b>Wärmebedarf</b>		
Heizgruppen für Raumtemperaturen 12° bis 14°C	143 000 kWh	57 %
Heizgruppen für Raumtemperaturen 20° bis 22°C	60 000 kWh	24 %
Lüftungsanlagen	42 000 kWh	17 %
Warmwasseraufbereitung	5 000 kWh	2 %
<b>Total Wärmebedarf</b>	<b>250 000 kWh</b>	<b>100 %</b>
<b>Wärmeproduktion</b>		
Abwärmeproduktion zu Heizzwecken verwendet	222 500 kWh	83 %
Elektrodurchlauferhitzer	27 500 kWh	11 %
<b>Total Wärmeproduktion</b>	<b>250 000 kWh</b>	<b>100 %</b>

etwa 11% des gesamten Wärmeenergiebedarfs. Die Abwärmeproduktion erzielt im Jahr einen Überschuss, der hauptsächlich während der Sommerzeit anfällt. Wegen des geringen Wärmebedarfs der Heizgruppen im Sommer muss die Wärme durch das Kühlsystem abgeführt werden. Die Zusammenstellung Tabelle 9–1 ermöglicht eine Übersicht des Bedarfs und der Produktion. Die Zahlen sind gerundet; sie geben lediglich Grössenordnungen an.

## Betrachtung

Mit der Abwärmeeanlage soll die anfallende Verlustwärme der hydroelektrischen Anlage direkt zur Beheizung der Betriebsgebäude genutzt werden, möglichst ohne zusätzliche andere Energien verwenden zu müssen. Die Wirtschaftlichkeit der Anlage stand nicht im Vordergrund, vielmehr der Wunsch, keine fossilen Brennstoffe zu verwenden. Eine ölgefeuerte Heizungsanlage würde für die Deckung des Bedarfs um die 25 Tonnen pro Jahr verfeuern und dadurch die Umwelt zusätzlich belasten.

In Gemeinschaft mit den Erstellern der hydroelektrischen Ausrüstung konnte die Anlage mit den Bedürfnissen der Raumheizung und den Möglichkeiten der Abwärmeerzeuger in Einklang gebracht werden. In erster Linie musste auf einen verlustarmen Betrieb des Generators geachtet werden, das heisst, die Abwärmeverluste sind klein zu halten. Entsprechend wurden die notwendigen baulichen Massnahmen getroffen, um den Bedarf reduzieren zu können, so dass die Abdeckung grösstenteils durch die Abwärme erfolgen kann.

Adresse des Verfassers: Walter Hirsbrunner, dipl. Klimatechniker VSHL, Postfach 190, CH-3000 Bern 6.



## Kraftwerk Felsenau 1989 Elektrizitätswerk der Stadt Bern

### 10. Die Anlage im Wandel der Zeit

Manfred Kienle

Der nachfolgende Text gibt einen Rückblick auf den 80jährigen Betrieb der Zentrale Felsenau und die wichtigsten technischen Änderungen während dieser Zeit.

Résumé: L'histoire de la centrale de Felsenau

Le texte ci-dessous vous donne un regard en arrière sur l'exploitation de la centrale Felsenau durant les huit décennies de son existence. Il informe également des plus importantes transformations sur le plan technique.

Summary: The history of the power plant Felsenau

The following text will give you the possibility to pass in review the past eighty years since the power-station of Felsenau was inaugurated. It mentions also the most important technical transformations done during this time.

In der gut 80jährigen Geschichte des Kraftwerks Felsenau hat die Anlage und somit auch der Betrieb einen steten Wandel miterlebt. Auf einige Marksteine soll hier nochmals kurz zurückgekommen werden.

Am Anfang der Betriebsgeschichte waren insbesondere die kurz nach dem Bau des Werks erfolgte Erweiterung und der wenige Jahre später durchgeführte Ausbau der Anlage von grosser Bedeutung. So wurde die Zentrale nach der Inbetriebnahme 1909 bereits 1917 von 3 auf 5 Francis-Turbinen ausgebaut und die Nutzwassermenge von 50 auf 80 m³/s erhöht. 1931/32 folgte der Frequenz- und Spannungsumbau von 40 Hz, 3000 V auf 50 Hz und 6000 V.

1932.  
Vom März 1931 bis Juli 1932. Turbinen u. Generatoren  
umgebaut auf 214 Touren, 50 ~.  
Inbetriebsetzung Daten: Gruppe I. 10. Aug. 1931.  
" " 12. Sept. 1931.  
" " 9. Okt. 1931.  
" " 4. Dez. 1931.  
" " 27. Juni 1932.

Im Betriebsbuch können noch die folgenden wichtigen Eintragungen zum Frequenzumbau nachgelesen werden:

10. Aug. 1931. Feuer Generator I und Turbine in Betrieb genommen. 40 ~  
10. Sept. 1931. Feuer Generator II und Turbine in Betrieb genommen. 50 ~

1932. 7. bis 12. Nov. Generator I umgeschaltet von 40 auf 50 ~, womit die 40 ~ aufgelassen sind im gesamten Netz.

Der Frequenzumbau begann vermutlich im Herbst 1930. Wie aus damaligen Aufzeichnungen ersichtlich ist, konnte er zwei Jahre später abgeschlossen werden.

In den folgenden gut 30 Jahren war der Betrieb geprägt durch Kontinuität, verbunden mit den üblichen Unterhaltsarbeiten, besonders an den Turbinen. Darüber wird im Abschnitt Stauwehr noch berichtet.

Eine wichtige Neuerung konnte Anfang der 60er Jahre mit dem Parallelschaltautomaten eingebaut werden. Bis zu diesem Zeitpunkt erfolgte die Synchronisierung nur mit Hilfe des Synchronoskops, d.h. die eigentliche Netzaufschaltung geschah von Hand.

Mit dem Ersatz der alten offenen Schaltanlage gegen eine geschlossene und dem Einbau einer Kommandotafel (Blindschema) in den Jahren 1966–68 wurde ein wesentlicher Schritt für die Betriebs- und Bedienungssicherheit getan. Im Falle eines Kurzschlusses konnte sich dieser nun nicht mehr ausbreiten. Der Schaden blieb auf die betroffene Zelle begrenzt. Auch mussten die Schaltabhandlungen nicht mehr direkt in der offenen Anlage vorgenommen, sondern konnten am Blindschema ausgeführt werden. Diese Schaltanlage wurde, mit geringfügigen steuertechnischen Anpassungen, auch im neuen Werk weiterverwendet (Bild 10–1).

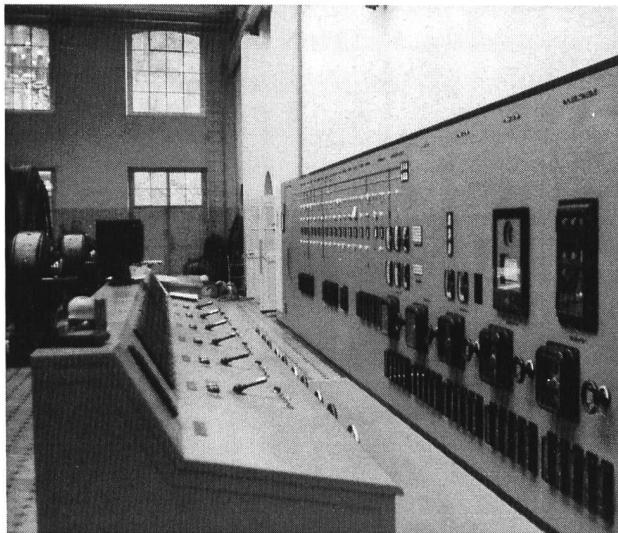


Bild 10–1. Die Kommandotafel mit dem Blindschema der 10-kV-Schaltanlage, links das Generatoren-Schaltpult.

Geprägt war der Betrieb aber auch durch die rasante Entwicklung des Stromverbrauchs der Stadt Bern. War in den Anfangsjahren die Zentrale Felsenau die bedeutendste elektrische Energielieferantin, hat in den letzten 40 Jahren die Anlage sukzessive an Wichtigkeit eingebüsst. Dennoch konnten 1963, beim schweizerischen Blackout, mit dem Werk noch grosse Teile der Stadt mit Strom versorgt werden, so z. B. das Gebiet Länggasse und das ganze Zentrum mit dem Hauptbahnhof. Aus der Entwicklungskurve des elektrischen Energiebedarfs (Bild 10–2) ist ersichtlich, dass dies heute nicht mehr denkbar wäre, deckt doch das Kraftwerk nur noch 7% des städtischen Strombedarfs (siehe auch Kapitel 4).

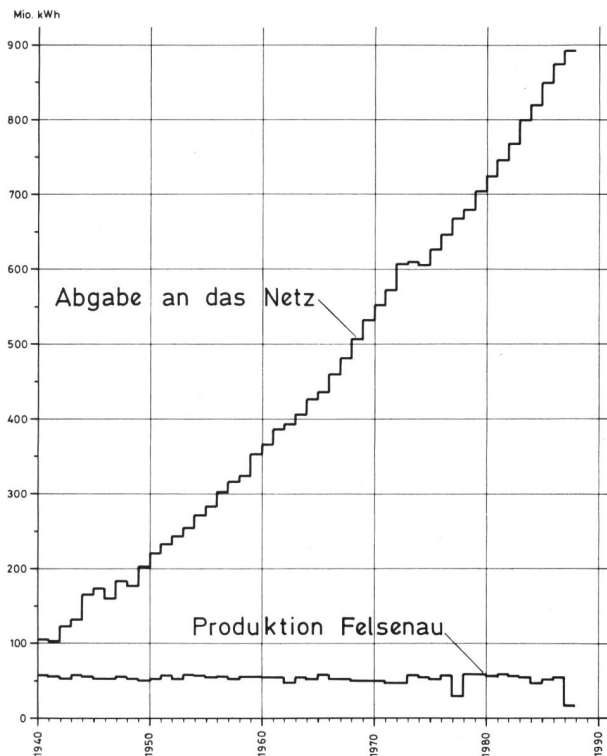


Bild 10–2. Vergleich der Stromproduktion des Kraftwerks Felsenau mit dem Verbrauch der Stadt Bern von 1940 bis heute.

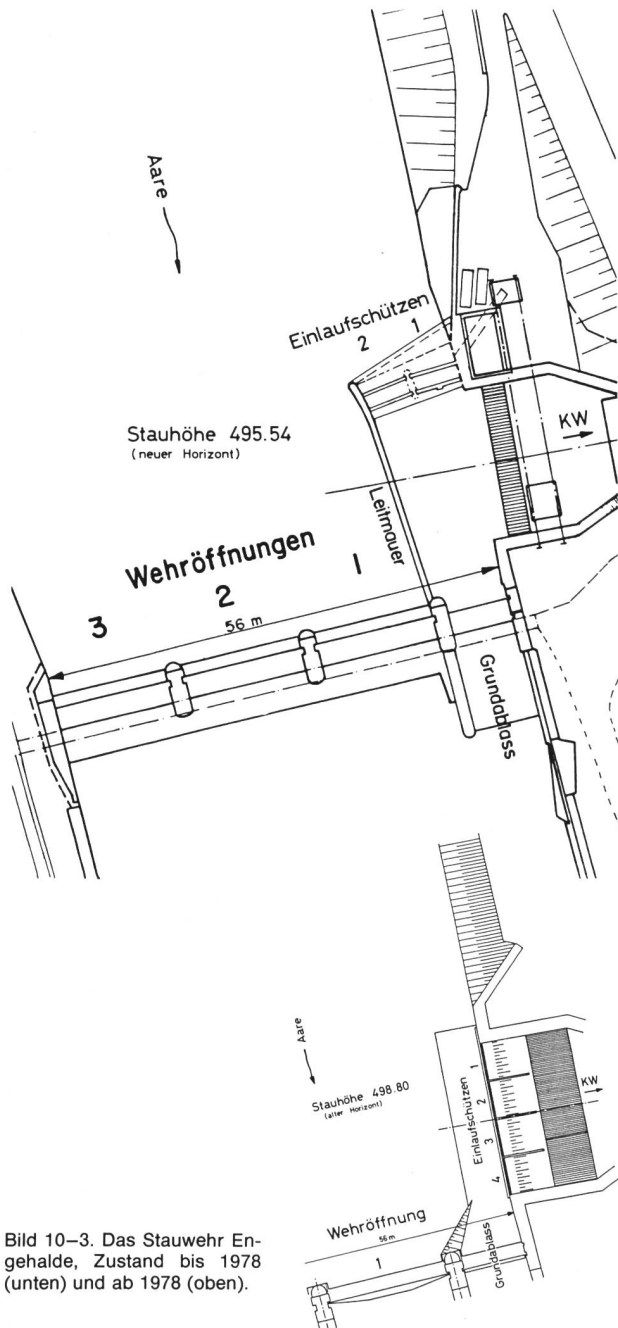


Bild 10–3. Das Stauwehr Engehalde, Zustand bis 1978 (unten) und ab 1978 (oben).

### Stauwehr

Das Stauwehr in der Engehalde war bis zu seinem Umbau 1978 nur im Handbetrieb zu regulieren. Notwendige Regulierungen wurden durch den Stauwehr-Wärter ausgeführt. Dieser wohnte im Stauwehr-Wärterhaus, das in unmittelbarer Nähe des Wehrs erstellt worden war. In Gewitternächten war es nicht aussergewöhnlich, wenn das Schichtpersonal der Zentrale bei Über- oder Unterschreitung der Stauhöhe 498,80 m ü.M. (alter eidg. Horizont, neu 495,54 m ü.M.) den Stauwehrwärter für Wehrregulierungen mehrmals aufbieten musste.

Besonders nachteilig auf den Betrieb und die Turbinen wirkte sich der hydraulisch ungünstige Einlauf aus (Bild 10–3, unten).

Tonnenweise Kies wurde zum Feinrechen der Zentrale verfrachtet und auch durch die Turbinen geschleust. Dies verursachte immer wieder Schäden an den Turbinen, was aufwendige Auftragsschweissungen erforderte (Bild 10–4). Zudem musste das Geschiebe in mühsamer Arbeit aus dem etwa 9 m tiefen Vorbecken entfernt werden (Bild 10–5).



Bild 10–5. Feinrechen vor dem Turbineneinlauf. Zwischen den beiden Haufen angeschwemmten Gerölls wurde ein Einschnitt ausgeräumt, um das Wasser ableiten zu können. Zustand vor dem Umbau 1978.

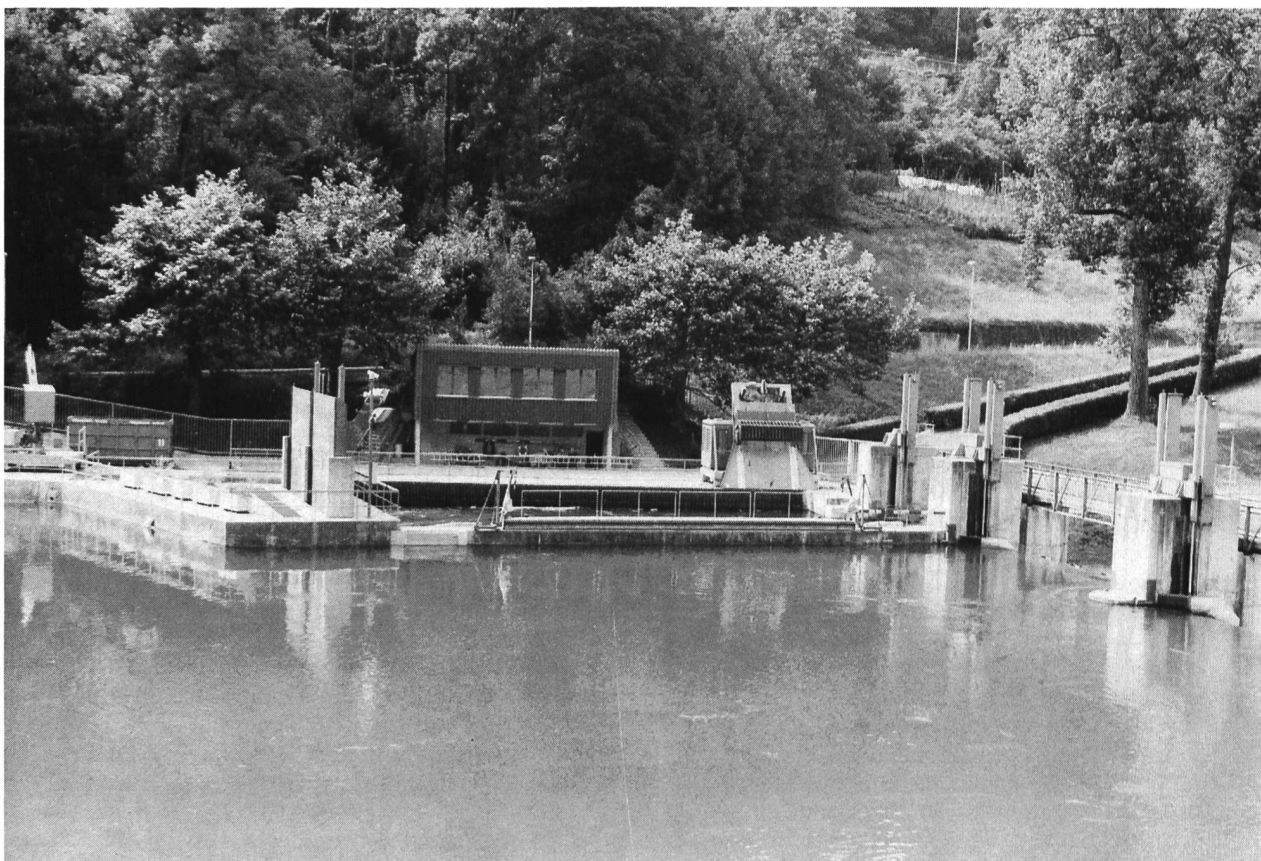


Bild 10–6. Der Einlauf nach dem Umbau 1978.

keine Schaufeln gelockert waren, sind Risse nicht von grosser Bedeutung.  
 Die Festschrauben in den Festschrauben haben schon wieder ziemlich viel Spiel.

5. Juli 1929. Turbine IV. Revision. Radschaufeln  
 Nr. 10 u. 11 vom äusseren Radkranz losgebrochen.  
 Nr. 9 zum Teil losgebrochen und Nr. 12 in der  
 Mitte des Blechs gerissen, ferner haben sämtl. Fächer  
 mehr oder weniger tiefe Fänggrise.  
 Schaufel Nr. 10 hat kurz nach der Verheftung noch  
 einen Querschnitt.  
 Reparatur durch Escher, H. v. C. u. C.  
 Schaufel Nr. 10. Mit Schweißnähte abgebrannt, dann  
 mit dem Schaufelblech im Radkranz zusammen geschweisst,  
 14 Stk. 3/8" Bolzen in den Kranz geschoben und mit der Schaufel  
 verschweisst, Riss im Blech ebenfalls verschweisst.  
 Schaufel Nr. 11. Grosse Risse vergossen wie bei Nr. 10.  
 Schaufel Nr. 9. Der losgebrochene Teil (1/3 Länge)  
 ausgebohrt und neu verschweisst, 3 Bolzen in den  
 Kranz geschoben und ebenfalls verschweisst.  
 Schaufel Nr. 12. Ausgetauscht wie Nr. 10 u. 11.  
 Schaufel Nr. 16. Auf 1/3 Länge abgebrochen, den  
 Riss ausgebohrt und neu verschweisst mit 4, 3/8" Bolzen.  
 Aug.

17. Juli 1929. Revision der Laufräder Nr. IV u. V.  
 Turbine Nr. IV Laufrad 2 (gegen das Basins) Zustand  
 unverändert seit 5. Juli 1929.  
 Laufrad 6. Schaufeln Nr. 9, 13 u. 16 auf 1/3 breiter nicht  
 angebrochen. Die Festigkeit des Rades nimmt fortwährend  
 ab ein Schweißen genannter Schaufeln wird in

Bild 10-4. Ausschnitt aus dem Betriebsbuch vom 5. Juli 1929 mit Aufzeichnungen über die Revision der Turbine IV.

Damit die Ursache dieses Kiesgangs eruiert werden konnte, wurde 1940 das Wasserbaulaboratorium der ETH beauftragt, durch Modellversuche eine Möglichkeit zur Verbesserung der Situation zu finden. Die vom Labor erarbeitete Lösung sah vor, vor dem Einlauf, zwischen Grundablass und Wehr, eine Leitwand zu erstellen. Aus Kostengründen wurde jedoch seinerzeit darauf verzichtet. Durch eine Reduktion der Maschinenleistung ab einer gewissen Abflussmenge der Aare (vermutlich 250 m<sup>3</sup>/s) konnte dennoch eine Verbesserung des Geschiebegangs erreicht werden, wie von ehemaligen Mitarbeitern zu erfahren war. Erst der Umbau des Wehrs im Jahr 1978 brachte die Lösung des Kiesgangproblems und gleichzeitig die automatische Wehrregulierung. Damit konnte die Funktion des Stauwehrwärters aufgehoben werden (Bilder 10-3, oben und 10-6). Bevor jedoch geplant werden konnte, wurden erneut an der ETH Modellversuche für das Einlaufbauwerk durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse konnte der Umbau durchgeführt werden. Im Prinzip wurden die Versuche von 1941 bestätigt, und in diesem Sinne wurde umgebaut. Die vergangenen Betriebsjahre haben die Ergebnisse verifiziert, dass auch bei grossen Wasserführungen der Aare und 80 m<sup>3</sup>/s Nutzwassermenge kein Geschiebe durch den Stollen transportiert wird. Leider wurde beim Wehr an der alten Konzeption von Regulierschütze und Klappe festgehalten. Mit drei Segment-schützen könnte das Wasser besser und einfacher reguliert werden.

## Schichtarbeit

Der Betrieb der Anlage wurde im 2-Mann-Schichtbetrieb gewährleistet, wobei der erste Mann den Dienst am Schalt-pult ausführte und der zweite Mann den Maschinenunterhalt versah sowie die Rechenreinigungsmaschine bediente. Die Schichtarbeit hat neben vielen Vorteilen bezüglich Frei-

zeitgestaltung auch Nachteile, vor allem im zwischen-menschlichen Bereich. Wegen des unregelmässigen Dienstes ist man sehr stark eingeschränkt, aktiv in einem Verein mitzuwirken oder an Veranstaltungen an Wochenenden teilzunehmen. Es braucht Eigeninitiative, damit der Schichtarbeiter nicht zum Einzelgänger und somit zum Aussenseiter der Gesellschaft wird.

Es wird immer schwieriger, für Schichtarbeit Personal zu rekrutieren. Mit Hilfe einiger technischer Einrichtungen und Betriebsautomatisierungen wurde es möglich, dass für die Überwachung der Anlagen 1 Mann genügt. Der 1-Mann-Schichtbetrieb wurde während etwa zehn Jahren bis zum 22. April 1988 durchgeführt. An diesem Tag wurde der Betrieb der alten Anlage eingestellt und unverzüglich mit deren Abbruch begonnen.

Die neue Anlage, deren Rohrturbine am 22. Februar 1989 erstmals drehte, läuft nun vollautomatisch und wird von der Leitstelle Monbijou überwacht und ferngesteuert.

Adresse des Verfassers: Manfred Kienle, Abteilungsleiter Energie, Elektrizitätswerk der Stadt Bern, Sulgeneckstrasse 18, CH-3001 Bern.



Kraftwerk Felsenau 1989  
 Elektrizitätswerk der Stadt Bern

## 11. Regulierungssysteme

Hans Naeff

### Zusammenfassung

Die Leittechnik ist in die drei Teilsysteme Sequenzer, Alar-mierung und Funktionsgruppensteuerung aufgeteilt. Sie wurde mit dem System Procontrol von ABB realisiert. Die Wasserregulierung hat hauptsächlich die Aufgabe, die vor-handene Wasserkraft optimal auszunutzen, wobei unzuläs-sige Pegelstände im Bassin ebenso zu vermeiden sind wie Sunk-Schwall-Bildungen in der Aareschlaufe Engehalde-Kraftwerk Felsenau. Die Fernwirkanlage dient der Daten-übertragung zwischen dem Kraftwerk Felsenau und der Leitstelle Monbijou. Die Maschinengruppe wie auch die Schaltanlage können von der Leitstelle aus auf einem Bild-schirm überwacht werden, wobei mittels Keyboard und Cursor Befehle an Einzelaggregate gegeben werden kön-nen.

### Résumé: Les systèmes de réglage

Le système de contrôle est divisé en trois parties: séquen-ceur, alarme et contrôle des groupes de fonction. Le contr-ôle a été réalisé par le système Procontrol de l'ABB. La ré-gulation d'eau doit surtout exploiter optimalement l'énergie hydraulique. Il faut éviter des niveaux inadmissibles dans le bassin ainsi que des instabilités dans la courbe de l'Aare entre l'Engehalde et la centrale hydraulique de Felsenau. L'installation de télécommande sert à la transmission de données entre la centrale hydraulique de Felsenau et la centrale de commande Monbijou. En outre, le groupe hy-droélectrique ainsi que l'installation de distribution peuvent être surveillés à l'écran. En même temps, des commandes peuvent être données aux agrégats particuliers par clavier et curseur.

### Summary: The regulation systems

The machine control system is divided into three parts: se-quencer, alarm and function group control. The machine

control has been realized by the system Procontrol produced by ABB. The water regulation essentially has to exploit the water-power as efficiently as possible. Inadmissible water levels in the basin are to be avoided as well as any instability in the Aare between Engehalde and the power plant Felsenau. The remote control installation serves as transmission of informations between the power-station Felsenau and the main control centre Monbijou. Furthermore the machine group as well as the indoor switchyard can be surveyed on the screen, while commands may be given to the particular units by keyboard and cursor.

## Erregungssystem

Beim eingesetzten Erregungssystem (Bild 11–1) handelt es sich um einen modularen Spannungsregler mit eingebautem Stellglied für einphasige Anspeisung.

Die Reglerelektronik, Steuerung und die vollgesteuerte Thyristorbrücke des Leistungsteils sowie das Außererregungsschutz und ein Messshunt für den Erregerstrom sind in einer Etage eingebaut. Neben der lokalen Bedienung und Signalisierung der Betriebszustände sind Fernbedienung und Fernsignalisierung im Kommandoraum vorhanden. Mit Ausnahme weniger Schnittstellen sind alle Funktionen elektronisch ausgeführt und somit über die gesamte Lebensdauer verschleissfrei. Bei einer Störung des Erregersystems schaltet es automatisch auf den zweiten Kanal um. Es kann auch manuell umgeschaltet werden, wobei der Kanal I dem Kanal II nachgeführt werden muss, bis das Balance-Voltmeter auf 0 Volt abgeglichen ist. Mittels Prüfbuchsen und LED-Anzeigen (Luminiszenz-Elektronik-Display) kann der Betrieb gut überwacht und bei Störung schnell eine Diagnose gestellt werden. Die Prüfbuchsen helfen vor allem bei Revisionen, die Sollwerte einzustellen und die entsprechenden Istwerte zu analysieren.

Der Sollwertregler besteht aus einem digitalen Vorwärts-Rückwärts-Zähler und einem Digital-Analog-Wandler. Damit sich die Ansteuerung potentialfrei und unabhängig von örtlichen Verhältnissen durchführen lässt, ist die Digitaleingabe als Potentialstufe zwischengeschaltet. Der Erregerstrombegrenzer misst den Feldstrom vor dem Stellglied. Die Diodenrichtung zeigt an, dass er keine höhere Steuerspannung zulässt, also den maximalen Feldstrom vorschreibt. Der Polradwinkelbegrenzer bildet den inneren Winkel der Maschine aus Generatorstrom und -spannung nach und erfasst so die Stabilitätsgrenze bei zu geringer Erregung.

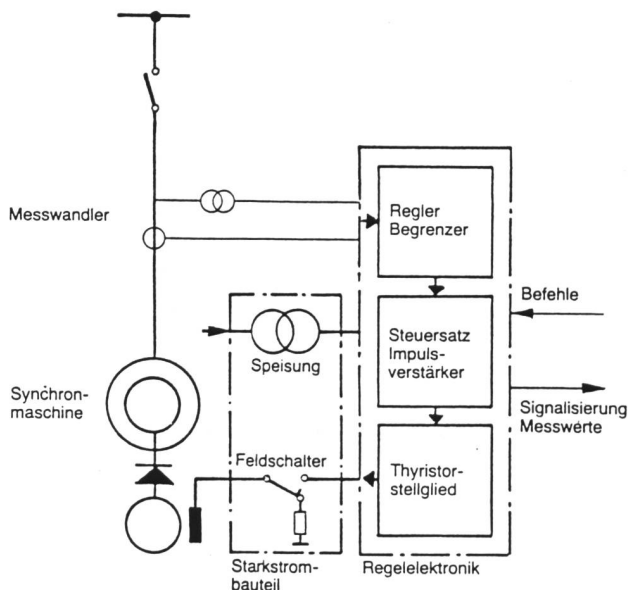


Bild 11–1. Aufbau der Erregung für das Kraftwerk Felsenau.

Wie die Diodenrichtung andeutet, lässt er keine zu niedrige Erregung zu. Die vom analogen Regelteil abgegebene Steuerspannung gelangt zu den Funktionsbausteinen für die Erzeugung und Verstärkung der Zündimpulse für die Thyristoren. Der einphasige Steuersatz enthält einen eingebauten Impulsverstärker. Seine Ausgangspulse gehen also direkt zum jeweiligen einphasigen Thyristormodul. Im Spannungsregler wird der Istwert der Generatorspannung gleichgerichtet und gefiltert. Der Regelverstärker verstärkt die Differenz zwischen Soll- und Istwert mit einem durch die Gegenkopplung bestimmten Zeitverhalten. Ein Impedanzwandler ermöglicht die Einführung von dominanten Begrenzungs-signalen.

## Wasserregulierung

Die Wasserregulierung des Kraftwerks Felsenau hat folgende Hauptaufgaben zu erfüllen:

- Die vorhandene Wasserkraft soll dauernd ausgenützt werden können, d.h. Ausnutzung der maximal zulässigen Wassermenge bei bestmöglichem Gefälle und Wirkungsgrad.
- Im Vorbecken Felsenau dürfen keine unzulässigen Wasserstände auftreten. Pendelungen des Wasserstandes sind zu vermeiden.
- Das Pflichtwasser muss dauernd eingehalten werden.
- Unzulässige Schwall- und Sunkerscheinungen in der Aareschleife zwischen Stauwehr Engehalde und Felsenau sind zu vermeiden.
- Die zu turbinierende Wassermenge hängt von der Wasserführung der Aare ab.
- Der Sollwert des Wasserstandes beim Pegel Engehalde ist permanent auf 495,54 m ü.M. zu halten. Dieser Pegel gilt als Referenzwert für die gesamte Wasserregulierung. Weicht der Pegel vom Sollwert ab, wird der Wasserdurchfluss der Turbine gedrosselt, bis der Sollwert wieder erreicht wird. Gleiches gilt, wenn der Rechen Engehalde verstopft ist.

Beim Anfahren nach einer Totalabstellung hat der Wasserregler die Aufgabe, während mehrerer Stunden langsam das Wasser von der Aare abzuzweigen und durch den Grundablass abfließen zu lassen, so dass keine Sunkerscheinungen auftreten. Fließt die zu turbinierende Wassermenge durch das Vorbecken, kann mit dem Starten der Maschinengruppe begonnen werden. Sobald die Maschine synchronisiert ist, soll sie nach einem automatischen Anfahrprogramm hochgefahren werden. Die Zunahme der Durchflussmenge durch die Turbine entspricht dabei der Abnahme der Durchflussmenge durch die Entlastungsorgane. Zuerst schliesst der Schütz, anschliessend die Klappe. Das Anfahrprogramm kann bei jedem Aarestand gestartet werden.

Bei einem Notschluss der Maschinengruppe wird zuerst die Last abgeworfen, und die Turbine schliesst dabei den Leitapparat und die Laufräder. Die Entlastungsorgane übernehmen sofort die entsprechende Wassermenge, die über das Vorbecken in die Aare geleitet wird. Bei diesem Ablauf werden Schütz und Klappe auf eine Voröffnung gebracht, um ein übermässiges Ansteigen des Wassers im Vorbecken zu vermeiden. Anschliessend öffnet sich die Klappe, dann der Schütz in Funktion der vorher turbinierten Wassermenge. Die durch die Turbine fliessende Wassermenge wie auch der Aareabfluss werden permanent im Wasserregler überwacht. Bei genügendem Aareabfluss regelt die Wasserregulierung den Turbinendurchfluss auf 80 m<sup>3</sup>/s, wobei variable Regelpulse an den Turbinenregler abgegeben werden, welcher via Lauftrad und Leitapparat die Durchflussmenge korrigiert.

Mit der Wasserregulierung kombiniert ist auch ein Fernbus Procontrol P42, der die Befehle, Rückmeldungen sowie analoge Messwerte zwischen Stauwehr Engehalde und der Zentrale überträgt (Bilder 11–2 und 11–3). Der Fernbus besteht aus einem Koaxialkabel, das parallel zu einem 132-kV-Hochspannungskabel durch den Stollen Engehalde–Felsenau verlegt ist. An den Kabelenden des P42-Fernbusses befindet sich je eine Koppelelektronik an den P13-Nahbus. Im Kraftwerk Felsenau werden die benötigten Daten direkt dem Fernbus auf serieller Basis entnommen und in der Regulierung verarbeitet. Beim Ausfall eines Pegels der Wasserregulierung schaltet der Regler automatisch auf eine Notsteuerung um, so dass auch in einem Störfall der Betrieb gewährleistet ist.

### Maschinen-Leittechnik

Die Maschinensteuerung ist aufgeteilt in die Teilsysteme Sequenzer und Alarmierung. Sie ist mit Procontrol P13 realisiert (Bild 11–4). Die Funktionsgruppen und Antriebssteuerungen sowie der mechanische Schutz wurden mit Procontrol K realisiert. Aufgabe der leittechnischen Systeme im Kraftwerk Felsenau ist u. a. die Überwachung. Zu überwachen ist der Zustand der Anlage. Die dazu nötigen Informationen sind Betriebs-, Alarm- und Störmeldungen, analoge Messwerte sowie Grenzwertüberwachungen. Der Sequenzer ist mit fünf Start-Stopp-Programmen ausgestattet. Starten und Stoppen kann auf einfache Weise mit Tastendruck auf der Sequenzerplatine oder über die Fernwirkanlage erfolgen. Ein Display zeigt dem Wartpersonal an, in welcher Stufe sich das Programm befindet. Fehlen z. B. Kriterien oder Anfahrkriterien, erscheint auf dem Display der Name des entsprechenden Kriteriums. Auch wird die Anzahl der noch zu erfüllenden Kriterien angezeigt. Die Zeit für die einzelnen Programmschritte wird überwacht, d. h. braucht eine Pumpe zu viel Zeit um einen gewünschten Druck aufzubauen, erscheint das Signal Zeitüberschreitung.

Die Alarmierung enthält 240 Einzelalarme, aufgebaut in vier Funktionsblöcke. Wird z. B. irgendwo Öl zu heiss, gibt es einen Einzelalarm im Kommandoraum. Viele der Alarme werden auf die Fernwirkanlage geführt, wo sie protokolliert werden. Mit dieser feinen Aufschlüsselung ist es in einem Störfall möglich, die entsprechende Pikettperson aufzubie-

ten. Der mechanische Schutz ist redundant aufgebaut. Jeder Schutzkanal enthält die drei Abstellprogramme Notschluss, Schnellschluss 1 und Schnellschluss 2. Tritt eine Störung im Betrieb auf, wird je nach Art der Meldung eines der drei Abstellprogramme aktiviert, das dann die gesamte Anlage in einen definitiven Stillstand führt. Der mechanische Schutz kann während des Betriebes gewartet werden. Die Funktions- und Antriebssteuerungen geben Befehle ans Motor-Control-Center ab. Die Rückmeldungen der Module und der entsprechenden Aggregate werden verarbeitet und überwacht. Diese Steuereinheiten erhalten die Ein-/Aus-Befehle vom Sequenzer im Automatik-Modus oder Hand-Modus über Drucktasten. Die Funktionsgruppen sind wiederum in Unterautomatiken aufgeteilt. Der Funktionsblock schaltet bei einem Ausfall einer Kühlwasserpumpe automatisch die bereitstehende zweite Pumpe ein und signalisiert dieses Umschalten dem Kommandoraum. Das gleiche Vorgehen ist z. B. bei einer Druckölpumpe gegeben, wenn sie den Öldruck nicht aufzubauen vermag.

Um bei Revisionsarbeiten besser von Hand steuern zu können, wurden auf Maschinenhöhe je ein Generator- und ein Turbinen-Vor-Ort-Steuerschrank installiert, identisch mit beiden Steuerschränken im Kommandoraum.

### Fernwirkanlage

Es wurde ein Fernwirksystem gewählt, das sich zu einem etappenweisen Ausbau eignet.

Die Steuerung und Datenübertragung zwischen der Maschine bzw. der 11-kV-Innenraumschaltanlage und der Leitstelle Monbijou erfolgt über ein Fernwirksystem. Der Verbindung Kraftwerk/Schaltanlage zur zentralen Leitstelle dient ein Glasfaserkabel. Über das gleiche Glasfaserkabel wird das werkinterne Telefon geführt, das seinerseits mit dem öffentlichen Telefonnetz verbunden ist.

Zur Steuerung und Überwachung der gesamten Anlage sind zwei Rechner eingesetzt, einer davon steht in der Felsenau, um das Kraftwerk autonom betreiben zu können. Daten und Zustände werden ausschliesslich über einen Bildschirm und einen Drucker angezeigt. Auf dem Bildschirm werden in Form von anwählbaren Bildern u. a. folgende Informationen wiedergegeben:

- graphische Darstellung der Maschinengruppe,
- graphische Darstellung des Wasserhaushalts (Bild 10–5),

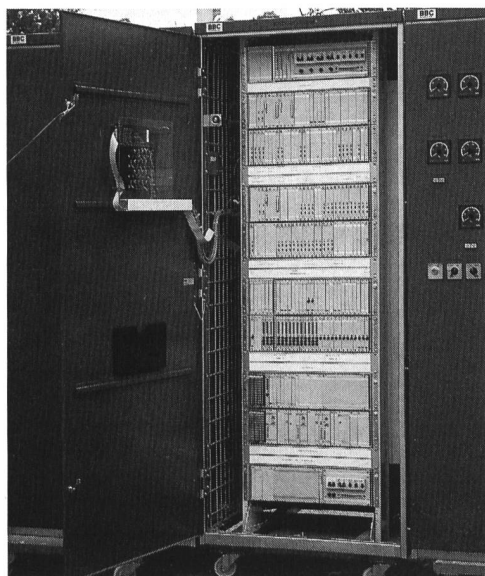


Bild 11–2. Die Anordnung der Wasserregulierung und des Fernbusses. Rückansicht.

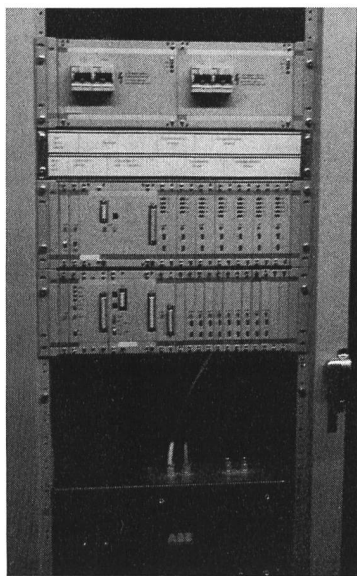


Bild 11–3. Die Anordnung der Wasserregulierung und des Fernbusses. Frontansicht.

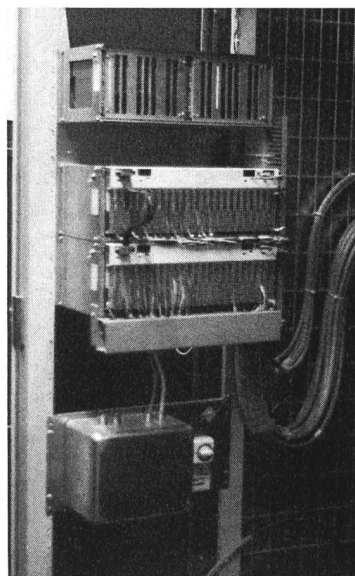


Bild 11–4. Procontrol-P13: Elektronik für Sequenzer und Alarmierung. Gebermodule und Synchrotakt III.

- «wasser, energie, luft – eau, énergie, air» 81. Jahrgang, 1989, Heft 10, CH-5401 Baden

## 12. Kunst im öffentlichen Raum

Peter J. Betts

### Zusammenfassung

Mit der Realisation von zwei kulturellen Projekten, dem Tropengarten von Hans Triet und der Schwebeplastik von Christian Rothacher, soll der Öffentlichkeit ein zusätzlicher Erlebnisraum erschlossen werden. Die beiden Objekte sind als Beitrag zu einem Bewusstseinsprozess zu verstehen zum Themenkreis: Natur, Technologie, Künstlichkeit, Umgang mit Kräften und Grössen.

### Résumé: Arts et ouvrages publics

Les deux projets culturels retenus dans le cadre de l'aménagement de la nouvelle centrale hydro-électrique de Felsenau – le «Jardin tropical» de Hans Triet et la «Poutre hydraulique» de Christian Rothacher – tendent conjointement à favoriser auprès du public la prise de conscience d'éléments ou de notions tels que nature, technologie, force et puissance, art et artifice.

### Summary: Graphic and plastic arts in public space

The accomplishment of two cultural projects – the "Tropical Garden" by Hans Triet and the "Floating Sculpture" by Christian Rothacher – will open up for the public a field of experience in addition to a complex technological achievement surrounded by an impressive display of nature. Both works of art contribute to the awareness of nature, technology, art and artificiality, force and power.

### Ein Grundsatz

Bei öffentlichen Bauvorhaben geht es darum, die Denkweise von Künstlerinnen oder Künstlern, ihre Art, scheinbar oder anscheinend unabänderliche Gegebenheiten zu betrachten, ihr Form- oder Farbverständnis, ihre Ansichten über Nutzungsmöglichkeiten, ihr Empfinden über Wohnen, Arbeiten und Leben «in öffentlichen Räumen» in das gesamte Bauprojekt einfließen zu lassen.

### Kein «künstlerischer» Schmuck, kein Kulturalibi

Zwar hat Kunst im öffentlichen Raum die Funktion kultureller Orientierungshilfe, ist aber zugleich Ausdruck eines klaren Formwillens, ist eigenständiger Bestandteil eines funktionalen Ganzen. Kunst im öffentlichen Raum greift in einen Prozess der Bewusstseinsbildung ein, setzt Auseinandersetzung voraus, birgt – wie jedes innovative Element – Risiken. Auch wenn bei Kunstwerken im öffentlichen Raum die Bemühung um Akzeptanz nötig ist, darf keine Konsenskunst angestrebt werden. Kunst im öffentlichen Raum soll also weder verzichtbares, schmückendes Beiwerk, Kosmetik, noch reiner Funktionsträger sein.

### Die Problemstellung beim Kraftwerkbau

Den Kunstschaaffenden wurde als mögliche Thematik eine künstlerische Umsetzung von Ideen zu folgenden Stichworten vorgegeben: *Licht – Wasser – Spiegelungen – Energie*. Als Randbedingungen wurden festgelegt:

- Das Kunstwerk – möglichst stabil, wartungsfrei und beständig ausgeführt – sollte vorzugsweise im Freien realisiert werden;

- das Bassin darf keine freischwimmenden Teile enthalten, da sich das Wasserniveau rasch ändern kann; das Objekt muss fest verankert sein;
- die Mauern des Bassins sind wasserdicht, was bei der Gestaltung zu berücksichtigen ist;
- es handelt sich um Fischereigewässer.

### Auswahlgruppe und Wettbewerb

Eine neunköpfige Auswahlgruppe, bestehend aus Vertretern des Elektrizitätswerks, den beauftragten Architekten und Ingenieuren sowie einer vierköpfigen Delegation aus der Städtischen Kunstkommission, erarbeitete Aufgabenstellung, Wettbewerbsprogramm und Randbedingungen. Die Auswahlgruppe beschloss, zwei voneinander unabhängige kulturelle Projekte zu realisieren, einerseits den Tropengarten, andererseits ein konkretes Kunstprojekt.

Hans Triet, Spezialist für Aquarien und Terrarien im Tierpark Dählhölzli in Bern, wurde zu einem Honorar von 2000 Franken beauftragt, die Idee für den Tropengarten zu ent-

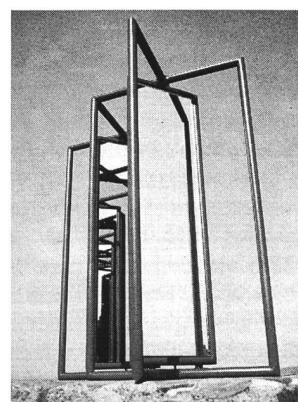
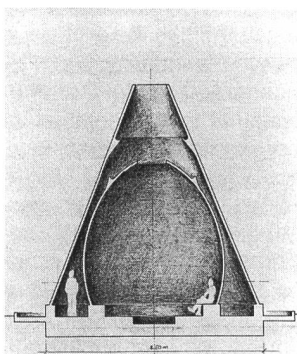


Bild 12-1, links. «Hommage à Boullée» von Herbert Distel. Nichtausgeführte Projektidee – ein kegelförmiges Bauwerk, konzipiert als Ort der Stille und von technologisch verfremdeten Umweltgeräuschen als Konzerten.  
(Foto: Herbert Distel)

Bild 12-2, rechts. «Drehspiegel» von Christian Megert. Nichtausgeführte Projektidee – ein Spiegelmobile als verspielter Kontrast zu Konzeptkunst.  
(Foto: Christian Megert)

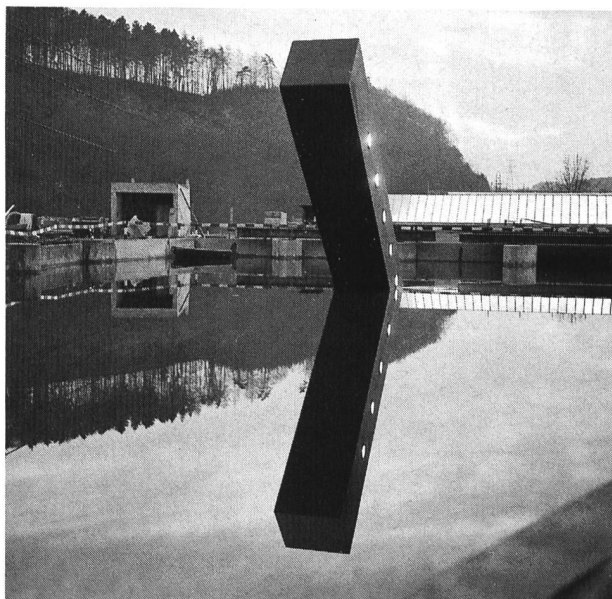


Bild 12-3. Schwebeplastik von Christian Rothacher. Das mit nachts beleuchteten Bullaugen versehene, quadratische Prisma ragt wie ein Seeungeheuer aus dem Ausgleichsbecken heraus, wo sich Himmel, Kunst und Aarelandschaft spiegelnd treffen.  
(Foto: Brigitte Lattmann)

wickeln, in Absprache mit dem Architekten und den übrigen technischen Fachverantwortlichen.

Aus einer Liste von über zwanzig in Frage kommenden Persönlichkeiten wurden vier Künstler beauftragt, gegen ein festes Honorar von 5000 Franken konkrete Ideen für die künstlerische Gestaltung zu erarbeiten. Gegenstand der Wettbewerbsaufgabe war auch ein verbindlicher Kostenvoranschlag für die Realisation zulasten des Baukredits. Zwei auswärtige und zwei Berner Künstler wurden angeschrieben: *Christian Herdegg*, Zürich, *Christian Rothacher*, Aarau, *Herbert Distel* und *Christian Megert*. Nach der Begehung und Fragenbeantwortung verzichtete Christian Herdegg auf die Teilnahme am Ideenwettbewerb, die übrigen drei Künstler stellten der Auswahlgruppe faszinierende Projektideen anhand von Skizzen, Modellen und mündlichen Kommentaren vor.

## Zwei Projekte, die nicht realisiert wurden

### Herbert Distel

Das Projekt *«Boullée»*, benannt nach dem berühmten französischen Revolutionsarchitekten (Bild 12–1), besteht aus zwei Schwerpunkten: einem kegelförmigen Bauwerk aus rotem Backstein und einer speziellen Elektronik, um musikähnliche Geräusche im Baukörper zu erzeugen. Das acht Meter hohe, oben offene Bauwerk mit Innenmantel ist im Platanenpark im Bereich des bestehenden Brunnens vorgesehen. Im neuen Kraftwerk sowie in der näheren Umgebung werden Mikrophone installiert, die zur Weiterverarbeitung an Mikroprozessoren, Zufallsgenerator und Equalizern angeschlossen werden. Im Bauwerk – als Ort der Stille bezeichnet – entstehen anschwellende und abklingende, musikähnliche Geräusche in Intervallen von zehn bis fünfzehn Minuten. Die Kosten werden auf rund 355 000 Franken veranschlagt.

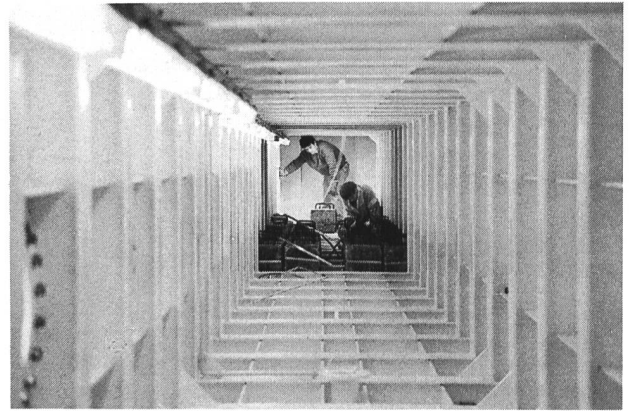


Bild 12–5. Schwebeplastik von *Christian Rothacher*. Im Innern von «Nessie» wird der Ballast – Voraussetzung zum Schweben – montiert.

(Foto: Brigitte Lattmann)

### Christian Megert

Das in einer idyllischen Umgebung gelegene Ausgleichsbecken soll mit einem acht Zentimeter dicken roten Handlaufrohr eingefasst werden. Zur Darstellung von «Licht – Wasser – Spiegelungen – Energie» sind zwei, sich durch Wind drehende Spiegel (etwa 65 × 250 cm), in einem Rahmen gefasst, vorgesehen (Bild 12–2). Je nach Windstärke entstehen verschiedene Lichtspiele. Das Rotieren stellt die drehenden Turbinen dar: Wechselspiele zwischen strengem Konzept und Zufälligkeit. Die Kosten werden mit rund 71 000 Franken veranschlagt.

## Die realisierten Projekte

### Schwebeplastik von *Christian Rothacher*

Eine eindruckliche Landschaft und eine imposante technische Anlage halten einander die Waage: im Zentrum das

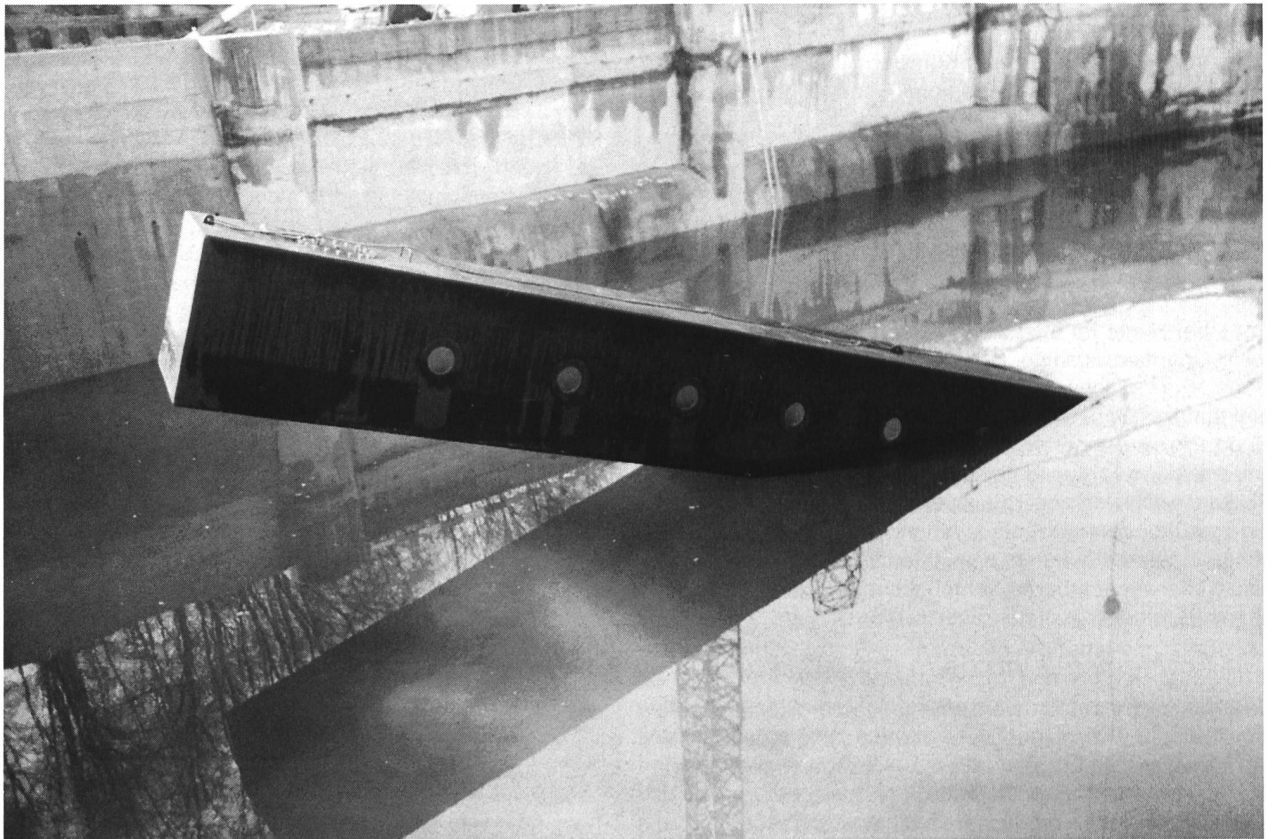


Bild 12–4. Schwebeplastik von *Christian Rothacher*. Schwimmversuche, kurz nach Montage und Verankerung im Ausgleichsbecken.

(Foto: Brigitte Lattmann)



Bild 12–6. Der Tropengarten von *Hans Triet*. Eine «prähistorische» Urlandschaft, der Amazonas: mitten ins Aarebecken von Bern hineingezaubert. Eines der vier Kulturprojekte als Erlebnisraum zum Themenkreis: Natur, Technologie, Künstlichkeit, Zeit–Leben. (Foto: Rolf Schläfli)

Ausgleichsbecken, das künstlerisch belebt werden soll. Eine Reihe neu zu pflanzender Pappeln oder anderer hoher schlanker Bäume verleiht der ganzen Anlage eine zusätzliche nachempfindbare Geometrie, die Turbinenachse respektive den Wasserlauf zur Turbine betonend. Im Bassin ist ein schräg aus dem Wasser ragender, schwimmender Stahlkörper vorgesehen, ein quadratisches Prisma, ein Balken, der am Boden beweglich montiert ist (Bild 12–3). Auf der einen Seite des von innen begehbaren Balkens sind zwölf Bullaugen eingebaut, die von innen beleuchtet werden (Bild 12–4). Die Plastik evoziert beispielsweise viele Ideen für eine Titelgebung, abhängig von der Phantasie der

Betrachtenden (Bild 12–5). Das Licht, das in der Tiefe des Wassers verschwindet, fordert ebenfalls zu Reflektion auf und wirkt bei Tageslicht völlig anders als in der Dunkelheit. Mit dem schwebenden Balken, der den Gesetzmässigkeiten des Wassers folgt, werden auch physikalische Kräfte auf einfache Weise visualisiert. Das Projekt wird mit 175000 Franken veranschlagt.

### *Tropengarten von Hans Triet*

Entlang der Staumauer des Kraftwerks führt ein öffentlicher Steg über die Aare. Die Aarelandschaft, durch das Kraftwerk und die übrigen Bauten zum Teil verändert, ist dennoch in ihrer Ursprünglichkeit von der geologischen Struktur und vom typischen Bewuchs her stark präsent. Mit dem Tropengarten reflektiert *Hans Triet* den Bezug zwischen Technologie und Natur, eröffnet Gedankenspiele, wie uns die Technik die Welt erschliesst. Mit einem Teil der im Kraftwerk entstehenden Abwärme wird es möglich, mitten in die nördliche Hemisphäre – beispielsweise auch im Winter, auch wenn die Ufer vereist sind und die Bäume schneebedeckt – ein Stück Tropenlandschaft hineinzuzaubern; Sinnbild dafür, wie nahe heute der Amazonas zu Bern gerückt ist. Stufenförmige Betonelemente mit Wasserbecken, eine bewusst künstliche Landschaftsarchitektur, als Gegensatz zur präsenten Nagelfluhlandschaft, verbindet architektonisches Alt und Neu. In der tropisch-feuchten, beheizten Anlage wachsen vier hohe Baumfarne und andere Farnarten, finden sich nektarfressende Vögel, höchstens zwölf Pärchen, worunter auch Kolibris (Bild 12–6). Das dem Spaziergänger leicht zugängliche Schaufenster in eine andere, «prähistorisch»-tropische Welt verdeutlicht, dass Leben auch Verantwortung voraussetzt: an 365 Tagen im Jahr, mit einem durchschnittlichen Arbeitsaufwand von etwa einer Stunde pro Tag, werden Mitarbeiter des Elektrizitätswerks Bern Vögel und Pflanzen pflegen müssen – oder dürfen?

Adresse des Verfassers: *Peter J. Betts*, Leiter der Abteilung Kulturelles, Präsidialdirektion der Stadt Bern, Gerechtigkeitsgasse 79, CH–3011 Bern.

**EWB**

**Kraftwerk Felsenau 1989**  
Elektrizitätswerk der Stadt Bern

## 13. Die Felsenau als Beispiel der Entwicklung der Wasserkraftnutzung

Beat Strasser

### Zusammenfassung

Die Nutzung der aus Wasserkraft gewonnenen Energie war früher standortgebunden. Diese Standorte waren naturgemäss Ansiedlungspunkte menschlicher Kultur. Mit der Möglichkeit, elektrische Energie über weitere Strecken zu transportieren, fiel diese Standortgebundenheit weg. Im ausgehenden 19. Jahrhundert setzte ein eigentlicher Boom von Kanalkraftwerken ein. In der Felsenau kann die historische Entwicklung der Nutzung der Wasserkräfte auf engem Raum verfolgt werden.

**Résumé:** La Felsenau comme exemple du développement de l'utilisation des forces hydrauliques

*Autrefois l'exploitation de l'énergie hydraulique a été restreinte à son lieu de production. Naturellement ces lieux ont*

*été colonisés par l'homme et sa culture. L'attachement direct à ces lieux a disparu avec la possibilité de transporter l'énergie électrique sur de grandes distances. A la fin du 19<sup>e</sup> siècle on a assisté à un grand développement des usines hydrauliques. A la Felsenau on peut suivre l'histoire du développement de l'énergie électrique et de son utilisation, et ceci dans un espace restreint.*

**Summary:** The Felsenau plant, a fine example for the development of exploiting water power

*In the past the use of energy gained from water power was located to sites of moving water, i. e. to the borders of a river. These locations naturally became settling grounds for human culture. With the technology of transmitting electrical power over long distances the use of this energy was no longer confined to the site of its production. In the late 19<sup>th</sup> century a large number of canal power stations were built all over the country. With the Felsenau plant the historic developing of the use of water power can be well observed on a confined area.*

Die Nutzung der Wasserkraft geht in der Schweiz in den Beginn des Mittelalters zurück. Zahlreiche Wasserräder lieferten damals die mechanische Energie für Kleingewerbebetriebe wie Mühlen, Sägereien und Schmieden. Für Bern gehen die Bestrebungen, die Stadt mit genügend Wasserkraft zu versehen, auf die erste Hälfte des 13. Jahrhunderts zu-

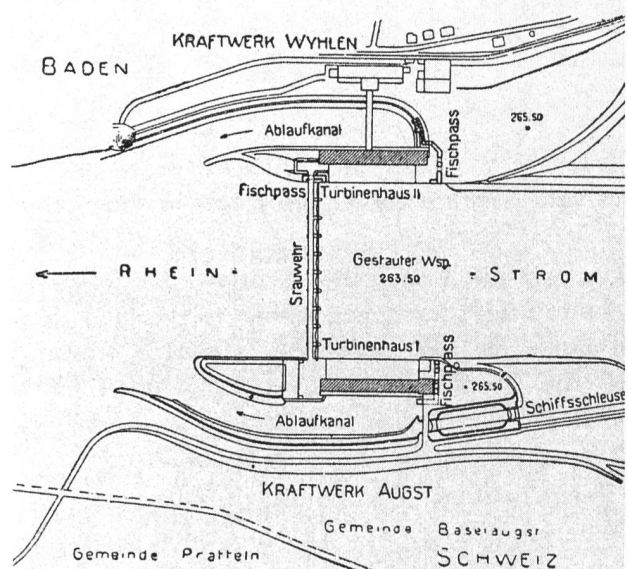
rück. Der Grossvater des *Imo von Tentenberg* erhielt damals von *Berchtold V. von Zähringen* ein Lehen, um das Wasser aus dem Weiher beim heutigen Weihermannshaus in die Stadt zu leiten und «am Schutz» die «Stetzmühle» zu treiben. Später kamen dort noch weitere Mühlen dazu. Auf diese Weise entstand der Stadtbach.

Die «Kraftwerke» aus dieser Zeit dienten dem Betrieb kleinerer Unternehmen. Gewinnung und Verwertung der Energie fanden damals am selben Ort statt. Die Übertragung von der Kraft- zur Arbeitsmaschine geschah dabei mittels Rädergetriebe, Riemen- oder Drahtseiltransmissionen. Die Nutzung der Wasserkraft war in diesem Stadium standortgebunden. Man erschloss die Wasserkräfte dort, wo sie sich darboten, und diese Standorte waren naturgemäss Ansiedlungspunkte menschlicher Kultur.

Einen wichtigen Schritt in der Entwicklung der Nutzung der Wasserkraft stellte die Erfindung der Turbine dar, welche erlaubte, grössere Wasserkräfte in elektrische Energie umzusetzen. Im Verlaufe des 19. Jahrhunderts wurden immer wieder neue Turbinenbauarten entwickelt: *Girard, Francis, Pelton* – um nur einige der wichtigsten Namen im Zusammenhang damit zu erwähnen (Bilder 13–1 und 13–2). Erst gegen Ende des letzten Jahrhunderts wurde es möglich, elektrischen Strom über grössere Distanzen zu transportieren. Die Energiegewinnung war damit nicht mehr standortgebunden, und es entstanden auch grössere Zentralen zur Gewinnung. Neben der Entwicklung im Turbinenbau war für die Kraftwerke die konstruktive Entwicklung der Bauformen von Bedeutung. Ohne die heute selbstverständliche Massenerzeugung von Zement zur Herstellung von Beton wären diese Bauwerke wohl kaum möglich gewesen.

Im letzten Dezennium des 19. Jahrhunderts setzt ein eigentlicher «Boom» im Bau von Wasserkraftwerken, namentlich von Niederdruckanlagen ein. Der Engländer *Ferranti* schlägt 1893 erstmals für das Kraftwerk Laufenburg vor, mit einem Bauwerk den ganzen Rhein zu stauen. Dieses Projekt wird zum Vorbild des Kraftwerkbbaus.

Grundsätzlich geht es bei diesen Niederdruckanlagen darum, einen Fluss aufzustauen, das Gefälle durch Verkürzung des Wasserlaufs mittels Oberwasserkanal zu vergrössern oder beides zusammen zu erreichen. Die ersten Werke dieser Art waren solche, die ihr Gefälle mit abzweigendem Kanal und relativ geringem Aufstau am Wehr zu gewinnen hatten. Nicht immer waren die topographischen Randbedingungen so günstig wie in der Felsenau. Durch die mäanderartigen Windungen der Aare war es möglich, mit einem 472 m langen Stollen in anstehendem Molassefels 10 km Stromschleife abzuzweigen und dadurch 10 bis 13 m Gefälle zu gewinnen (siehe Situationsplan, Seite 279). Das kurz danach (1910) erstellte Kraftwerk am Ölberg in



\* BILD 275. 1912. Augst-Wyhlen.

Bild 13–3. Das Kraftwerk Augst-Wyhlen (aus *W. Wyssling*).

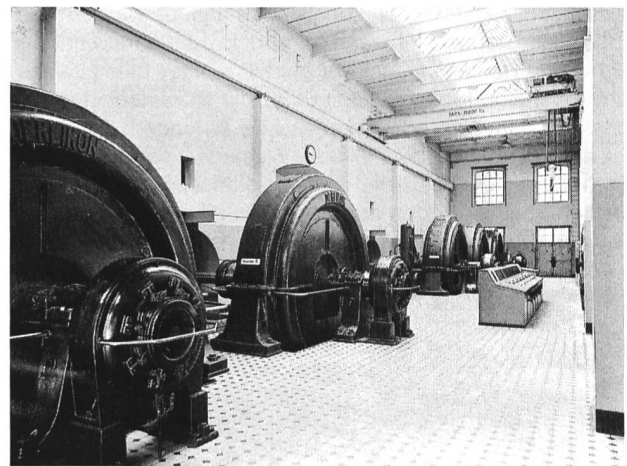


Bild 13–4. Die Maschinenhalle der alten Zentrale Felsenau (Foto: *Henn*).

Freiburg ist im übrigen in der Anlage ähnlich und ergibt eine interessante Parallele im technischen Zeitalter zwischen den beiden Zähringerstädten. Bei anderen Kraftwerken konnten bereits bestehende Gewerbekanäle (Aarau) benutzt resp. ausgebaut werden. Ab 1912 entstanden die

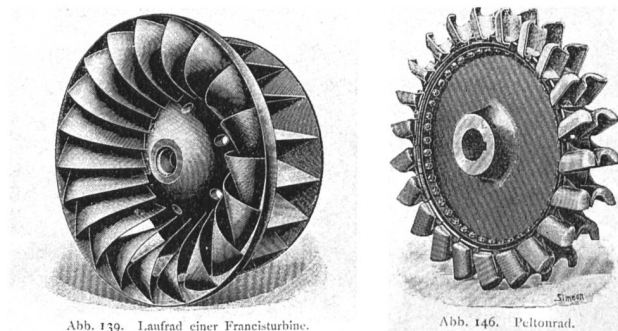


Bild 13–1, links. Laufrad einer Francis-Turbine (aus *E. Mattern*).

Bild 13–2, rechts. Pelton-Rad (aus *E. Mattern*).

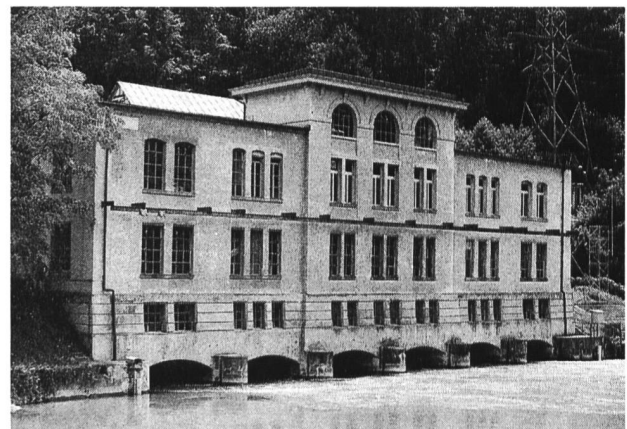


Bild 13–5. Die alte Zentrale Felsenau vor dem Neubau 1985 (Foto: Denkmalspflege der Stadt Bern).

Kraftwerke im Stromlauf und ohne Kanäle. Diese Bauart benötigt allerdings grosse Wassermengen und hat gegenüber den Kanalkraftwerken den Nachteil, dass unter Umständen ein weitreichender Rückstau entsteht, der aufwendige Verhandlungen erfordert und die Landschaft mitunter stark verändert. Als Beispiel sei hier das Doppelwerk Augst-Wyhlen (1912) erwähnt (Bild 13–3).

Architektonisch wurden diese Werke, und namentlich deren Maschinenhäuser, sehr selbstbewusst im Kontrast zur Natur als eigentliche «Schlösser der Technik» unter Zuhilfenahme des historistischen Formvokabulars gestaltet. Der Heimatschutz bekämpfte damals die zunehmende «Amerikanisierung» der Landschaft. Dazu ist heute allerdings festzustellen, dass zu dieser Zeit in Amerika Kraftwerke viel nüchterner und sachlicher, ohne denselben architektonischen Aufwand wie in Europa, ausgeführt wurden. In einer kritischen Betrachtung über «moderne Wasserkraftwerke» des Heimatschutzes wird das Werk Felsenau als «nüchterner, unerfreulicher Bau» dargestellt, wobei dies, dem damaligen Zeitgeist entsprechend, wohl am ehesten mit dem Flachdach einen Zusammenhang haben dürfte.

Als 1982 in Verbindung mit dem Neubau des Werks Felsenau die Frage diskutiert wurde, ob die alte Zentrale stehen bleiben soll, waren es in erster Linie ökonomische Gründe (vgl. Kapitel 5), die für eine Beibehaltung der alten Anlage sprachen. Dieser Entscheid hat auch einen sehr zu begrüssenden denkmalpflegerischen Aspekt. In der Felsenau kann heute die Industriegeschichte, und damit die Geschichte der Wasserkraftnutzung schlechthin, auf engem Raum nachvollzogen werden. Durch den Kauf des Areals der Spinnerei Felsenau durch die Stadt Bern und dessen Nutzung als Gewerbepark blieben die baulichen Zeugen einer Produktionsstätte, welche durch die notwendige Kraft-

gewinnung ursprünglich standortgebunden war, der Nachwelt erhalten. Durch die anschliessende «Planung Felsenau» konnten die Annexbauten und die dazugehörigen Wohnsiedlungen, die Fabrikanlagen, welche einen hohen sozialgeschichtlichen Stellenwert haben, gesichert werden. In der Maschinenhalle der alten Zentrale (Bild 13–4) steht heute als Schaustück eine der fünf alten Francis-Turbinen. Im übrigen wurde der Bau sorgfältig instandgestellt und erscheint heute wieder in seiner ursprünglichen weissen Farbe. Besonderes Augenmerk wurde auf die Gestaltung der Details verwendet. Die Fensterteilung, ein wesentliches Massstabelement bei diesem Industriebau, konnte wieder als Blendrahmen in ihrer ursprünglichen Form hergestellt werden (Bild 13–5). Auch die qualitätvollen Einfriedungen und Aussenbeleuchtungskörper (ein wichtiges Element der Selbstdarstellung bei einem Elektrizitätswerk) erhalten wieder ihren Platz im Areal. Mit der sorgfältigen Renovation dieser alten Zentrale ist ein weiteres Glied in diesem «Industriellehrpfad Felsenau» erhalten geblieben, und es ist besonders erfreulich, dass mit dem von den Architekten *Baumann* und *Grossen* sorgfältig gestalteten Neubau auch der Schritt ins 21. Jahrhundert manifestiert wird.

#### Ausgewählte Literatur:

- E. Mattern: Die Ausnutzung der Wasserkräfte. Leipzig, 1908.
- «Schweizerische Bauzeitung» Nr. 13, 1909.
- «Die Berner Woche», Jg. 1912.
- «Heimatschutz» Jg. 7, Heft 10, Oktober 1912.
- Walter Wyssling: Die Entwicklung der schweizerischen Elektrizitätswerke und ihrer Bestandteile in den ersten fünfzig Jahren. Zürich, 1946.

Adresse des Verfassers: *Beat Strasser*, Arch. HTL, SIA, Denkmalpflege der Stadt Bern, Postfach 72, CH-3000 Bern 8.



**Kraftwerk Felsenau 1989**  
Elektrizitätswerk der Stadt Bern

## 14. Architektur und Gestaltung

Wladimir Grossen und Andreas Baumann

### Zusammenfassung

*Volumetrische Vorstudien und Nutzungsdiagramme der Überlagerungen waren erforderlich, um zu einem klar gegliederten Baukörper zu gelangen. Trotz vielfältiger Anforderungen wurde versucht, bei der Koordination der baulichen Aufwendungen einen Gestaltungswillen spürbar werden zu lassen.*

### Résumé: Architecture et formes

*On a eu besoin d'études volumétriques préliminaires et de diagrammes d'utilisation pour arriver à un corps de construction bien structuré. Malgré les exigences variées, on a essayé de faire sentir la volonté de former un tout harmonieux.*

### Summary: Architecture and form

*Volumetric preliminary studies and diagrams of overlays were required to reach a well coordinated construction. In spite of the various requirements it was showed an intention of creativity and harmony.*

### Vorstudien

Um die Auswirkungen der verschiedenen Turbinentypen und deren jeweiligen Standorte auf die Gesamtanlage und das Bauvolumen zu studieren, wurden bereits zum Zeitpunkt der Anlagendisposition und Turbinenwahl Architekten beigezogen. Volumetrische Lösungsvorschläge wurden ausgearbeitet (Kapitel 5).

Einbauten der neuen Turbine im alten Gebäude mit einem Teilabbruch der bestehenden Zentrale und damit Überlagerungen von alten und neuen Bauteilen wurden geprüft (Bild 14–1).

Die aus wirtschaftlichen, hydrologischen und geologischen Gründen getroffene Lösung, Bau einer neuen Zentrale in der alten Schwallentlastungsrinne neben dem bestehen-

dem Vorbecken, ermöglichte die Erhaltung der alten Bau- substanz und hatte eine Durchmischung der Nutzungen in neuen und bestehenden Gebäudeteilen zur Folge. Dabei galt es, die dadurch entstandene Verflechtung und Überla- gerung der Leitungen und Kabel bereits in der Projektphase zu entwirren und zu ordnen.

Wichtigste Entwurfsgrundlagen:

- Abdrehung der Maschinenachse und des Auslaufs um 60° zur Aare-Fließrichtung (bestehende Zentrale 90°)
- Hauptmasse der neuen Maschinenhalle durch Montage und Wartung der Maschinengruppe umschrieben
- Massivbauweise aus statischen und Sicherheitsgründen
- Beibehaltung der Schaltanlage im bestehenden Ge- bäude (in den sechziger Jahren erneuert)
- Schwerlastzufahrten auf Dachniveau sowie im Erdge- schoss in die neue Maschinenhalle
- Optimierung der Leitungs- und Kabelführungen (Tren- nung zwischen Hochspannungs- und Steuerkabeln, möglichst kurze Verbindungen)
- Aufteilung der Gesamtanlage in viele Brandabschnitte (Eindämmung der Schäden bei Kabelbränden)
- Einbruchsicherheit

Ausserdem wurde von der Städtischen Kommission zur Be- gutachtung ästhetischer Fragen eine klare Abgrenzung der neuen Baukörper zum bestehenden Volumen gewünscht.

## Bauprojekt

### Neue Zentrale

Eigenständiger, massiver Baukörper, zurückliegender ein- gegrabener Maschinsaal mit Oberlichtern, vorgelagert kleingliedrige Betriebsräume, seitliches Treppenhaus als Hauptverbindung, mit neuem Eingang auf Dachniveau.

### Zwischentrakt

Verbindungselement der beiden massiven Körper, vergla- ste Stahlkonstruktion, im Sockelbereich vorgelagerter Trop- pengarten.

### Alte Zentrale

Renovierung der vorhandenen Baustruktur gemeinsam mit der Denkmalpflege, Absetzen der minimalen neuen Ein- griffe.

### Fassaden

Ablesbarkeit der räumlichen Grunddisposition, einheitliche Sockel- und Dachhöhen, gleiche Oberflächen und Farben der beiden massiven Baukörper, neuer öffentlicher Fuss- gängersteg als direkte Verbindung des Seftausteges mit dem bestehenden Uferweg Richtung Neubrück.

### Zusammenhänge

Übernahme der Achse und Geometrie der neuen Turbine in der Umgebungsgestaltung auf Dachniveau, als Zeichnung im Bodenbelag der Maschinenhalle, in der Fassade und Gestaltung der Uferpartie, um die grossen Zusammen- hänge Oberwasserschütz–Rohrturbine–Unterwasser- schütz–Auslauf erkennbar werden zu lassen.

Spannend war die Gestaltung sämtlicher technischer Räume in enger Zusammenarbeit mit Ingenieuren und Spe- zialisten, um aus anfänglich vielleicht widersprüchlich oder trocken erscheinenden Nutzungsanforderungen Gestal- tungsprinzipien und daraus logische Farb- und Formkon- zepte zu entwickeln.

## Bauausführung

Die etwa 20 m unter Vorbeckenniveau liegende Rohrturbine ergibt eine vorwiegend vertikale Anordnung der neuen Räume.

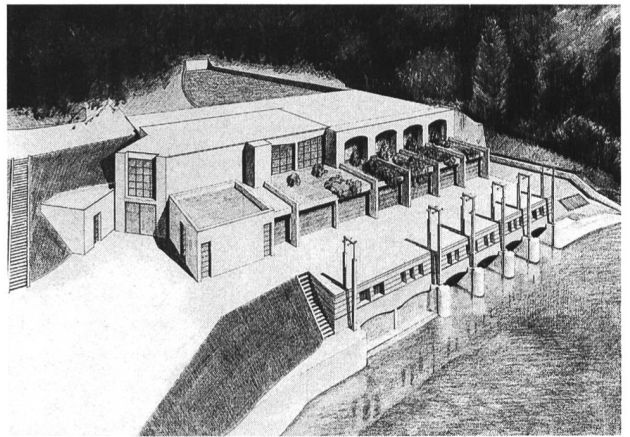


Bild 14–1. Nicht realisierte Umbauvariante Felsenau.

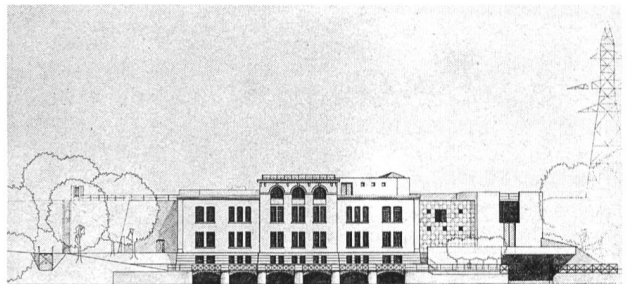


Bild 14–2. Fassadenansicht einer Umbauvariante, links die alte Zentrale, rechts der Zwischentrakt und das neue Maschinenhaus.

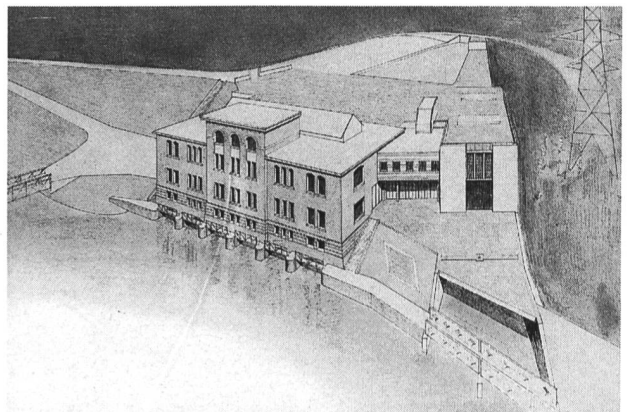


Bild 14–3. Perspektive der Baukörper für eine nicht realisierte Umbau- variante.



Bild 14–4. Die alte Zentrale Felsenau während des Umbaus. Rechts ist die Baugrube für das neue Maschinenhaus zu erkennen.

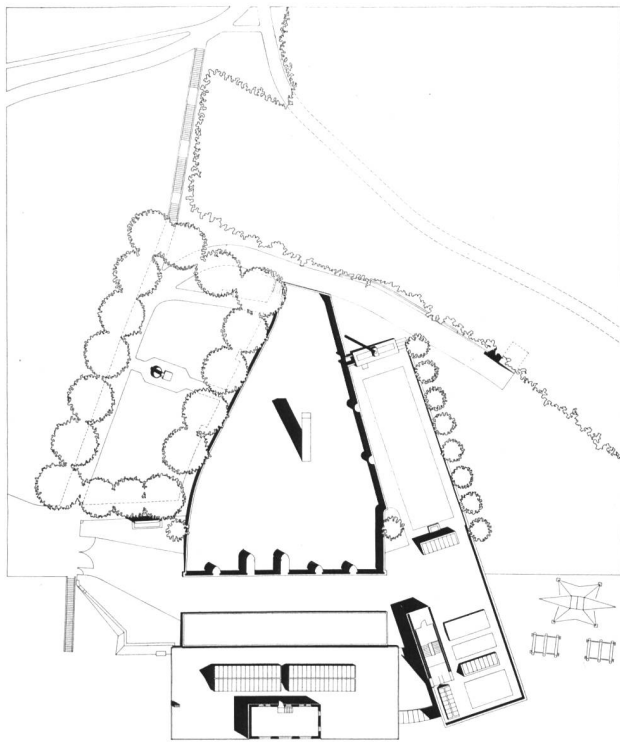


Bild 14-5 Situation, Massstab etwa 1:1300.



Bild 14-7. Die Maschinenhalle der alten Zentrale nach dem Entfernen der Generatoren.

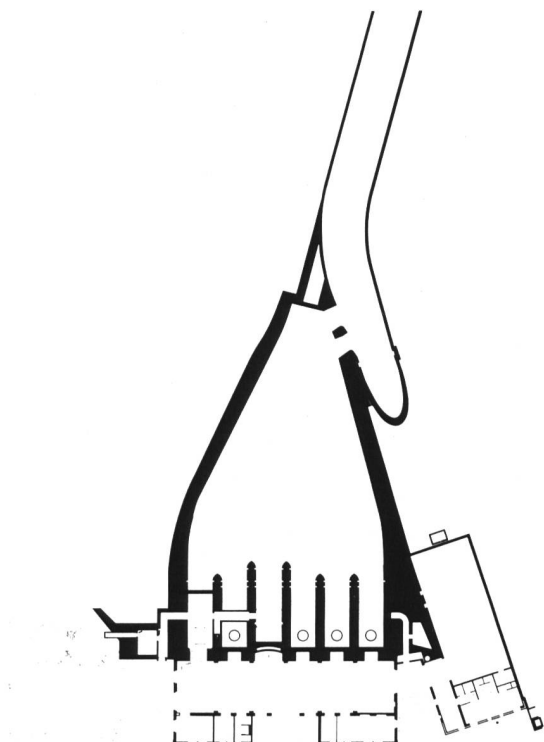


Bild 14-6. Grundriss Erdgeschoss, Massstab etwa 1:1300.



Bild 14-8. Die neue Maschinenhalle.

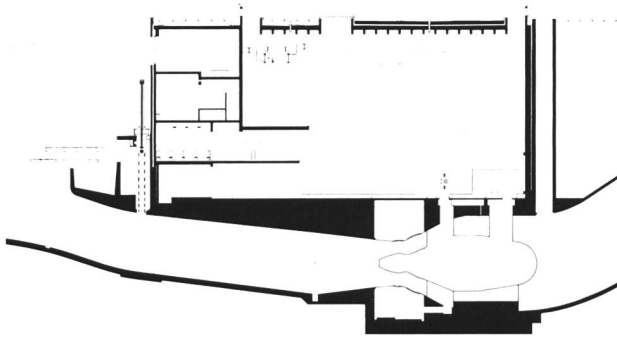


Bild 14–9. Schnitt durch die neue Zentrale. Massstab etwa 1:625.



Bild 14–11. Büro im Obergeschoss des Zwischentrakts.

Dies hatte zwangsläufig eine komplexe Baustelle mit einer ohnehin grossen Menge und Vielfalt von Leitungen und Verbindungen auf engstem Raum zur Folge, welche die Ausführung erschwerte.

Der Kraftwerkbetrieb mit der alten Zentrale sollte möglichst lange aufrechterhalten werden. Dazu war der alte Trafo am Standort des heutigen Zwischentrakts zu belassen und die Schaltanlage in der bestehenden Zentrale weiter zu betreiben. Dies ergab folgende Etappierung der Bauarbeiten:

1. Rohbau neue Zentrale und Druckstollen
2. Ausbau neue Zentrale und Rohbau Zwischentrakt
3. Ausbau Zwischentrakt und bestehende Zentrale

Dadurch mussten hochempfindliche Steuerschränke neben dem Rohbau des Zwischentrakts montiert werden, was zusätzliche provisorische Türen, Notdächer und Staubabdichtungen nötig machte.

Über allem lag unsere Absicht, den, verglichen mit einer normalen Neubaustelle, überdurchschnittlich vielen terminlichen und technischen Schwierigkeiten jeweils einzeln gerecht zu werden, ohne je das Projekt als Gesamtheit aus den Augen zu verlieren.

Tabelle 14–1. Hauptsächlichste Materialien und Farben im Innenbereich

Bodenbeläge	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kunststein Nero Portoro</li> <li>– Steinzeug achteckig grüngrau mit schwarzem Einleger</li> <li>– Überzüge gestrichen</li> </ul>
Wände	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sichtbeton, teilweise lasiert</li> <li>– Glattstrich, hellgrau gestrichen</li> <li>– isolierte Aluminiumprofile, grauweiss</li> </ul>
Fenster	– isolierte Aluminiumprofile, weissaluminium
Oberlichter, Glasabschlüsse	– Kupfer-Titan-Zink-Blech
Spenglerarbeiten	– Eisenglimmer dunkelgrau
Türen, Geländer	– Chromstahl
Beschläge, Türzargen	– Buche massiv natur, technisches Sperrholz
Einbaumöbel	– Granit Serizzo hell
Abdeckungen	– RAL-Farben gemäss Medium-Code
Leitungen, Aggregate	

Grüne und blaue Farbtöne wurden punktuell als Betonung wichtiger Elemente eingesetzt.

Adresse der Architekten:

Andreas Baumann und Wladimir Grossen, Architekten ETH, Helvetiastrasse 14, CH-3005 Bern (Mitarbeiter: Werner Kuhn und Bernhard Egger).

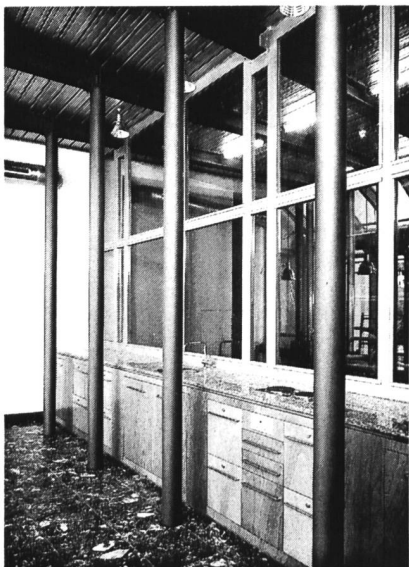


Bild 14–10. Aufenthaltsraum im Erdgeschoss des Zwischentrakts.



Bild 14–12. Garderobe im Erdgeschoss der neuen Zentrale.