

Das Kraftwerk Reichenau-Ems

Autor(en): **Lem, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **84 (1966)**

Heft 42

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-69001>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Das Kraftwerk Reichenau-Ems

DK 621.29

Von J. Lem, dipl. Ing. ETH, Patvag Technik AG, Zürich

A. Allgemeine Gesichtspunkte

Im Frühling 1962 wurde das Kraftwerk Reichenau-Ems als oberstes Flusskraftwerk am Rhein nach 2½-jähriger Bauzeit in Betrieb genommen. Es gehört zum Typ der Niederdruckwerke und nutzt ein Gefälle von rund 18 m aus. Ein Stauwehr, das 2,6 km unterhalb des Zusammenflusses des Hinterrhein und des Vorderrheins liegt, staut den Flusslauf auf einer Länge von rund 3,0 km ein. Beim rechten Widerlager des Stauwehres wird das Betriebswasser gefasst und durch ein eingedecktes Eisenbetonrohr und einen anschliessenden offenen Kanal dem Maschinenhaus zugeleitet, das rund 1 km flussabwärts, nördlich des Dorfes Domat/Ems liegt. Ein kurzer Unterwasserkanal leitet das Betriebswasser, das im Maximum 120 m³/s beträgt, in den Rhein zurück (Bilder 1 und 2).

Mit der Projektierung und der Bauleitung wurde die Patvag Technik AG in Zürich betraut. Als Experten wirkten mit Prof. Dr. R. Müller, Biel, und Dr. A. von Moos, Zürich. Die in mancher Hinsicht extremen Verhältnisse, die beim Bau und Betrieb eines Kraftwerkes am Rhein oberhalb des Bodensees bestehen, verlangen in verschiedener Hinsicht unkonventionelle Lösungen, die im folgenden näher beschrieben werden sollen.

1. Wasser- und Energiewirtschaft

Die theoretisch fassbare Wassermenge beträgt nach Fertigstellung der geplanten Speicher im Einzugsgebiet im Durchschnittsjahr rund 3100 Mio m³, davon entfallen 1400 Mio m³ auf den Winter und 1700 Mio m³ auf den Sommer. Das nutzbare Gefälle schwankt aus Gründen, die im nächsten Abschnitt erläutert werden sollen, ausserordentlich stark, und zwar zwischen etwa 19,3 m bei Niederwasser und etwa 7,4 m bei Hochwasser.

2. Flussbauliche Belange

Der Rhein ist im Bereiche des Kraftwerkes ein Wildwasser mit steil ansteigenden Hochwasserspitzen. Die grössten wurden in den Jahren 1927 mit 2200 m³/s und 1954 mit rund 1900 m³/s gemessen.

Schon bei einer Wasserführung im Bereich von 400 bis 1000 m³/s führt der Rhein bedeutende Mengen Schwebstoffe, Geschiebe und Geschwemmel. Um genauere Aufschlüsse über die Geschiebeführung und die Abflussverhältnisse zu erhalten, wurde eine Geschieberegung durchgeführt. Als Grundlage hierfür dienten die Ergebnisse der

seit Jahren ausgeführten Rheinvermessung und zusätzliche Vermessungen in den unteren Teilen des Vorder- und des Hinterrheins. Gleichzeitig wurden an den drei Flüssen Geschiebeanalysen vorgenommen und Messpegel erstellt. Die Resultate dieser Messungen und Berechnungen sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Da sich alle drei Flüsse in latenter Erosion befinden, sind die tatsächlich transportierten Geschiebemengen kleiner als diejenigen, welche den berechneten Transportvermögen entsprechen. Das Geschiebe läuft als eine dünne Schicht auf einer Unterlage mit gröberer Zusammensetzung. Führt man den massgebenden Geschiebedurchmesser der unteren, gröberen Sohlenschicht in die Rechnung ein, so ergeben sich die folgenden theoretischen Geschiebefrachten pro Jahr:

Rhein	$d_m = 54 \text{ mm}$	$G = 125000 \text{ m}^3$
Vorderrhein	$d_m = 75 \text{ mm}$	$G = 36000 \text{ m}^3$
Hinterrhein	$d_m = 90 \text{ mm}$	$G = 9000 \text{ m}^3$

Daraus geht hervor, dass die latente Erosion beim Vorder- und Hinterrhein ausgeprägter vorhanden ist als beim Rhein. Die tatsächlichen Geschiebefrachten liegen jeweils zwischen den angegebenen Werten. Am vereinigten Rhein wurde die Fracht mit rund 140000 m³/Jahr angenommen. Für den Abtransport dieser Menge genügt ein Flussgefälle von 2,5 ‰. Der vorhandene Gefällsüberschuss von rund 0,5 ‰ wurde in das Konzept des Kraftwerkes einbezogen, wie noch gezeigt werden soll.

Unterhalb der Wasserrückgabe befindet sich der Rhein in Erosion. In der Zeit von 1930 bis 1955 hat er sich im Mittel um etwa 1,5 m

Tabelle 1. Resultate der Geschieberegung

Flusstrecke	Massgeb. Gefälle	Mittlerer Korn-durchmesser	Grenzwasser-menge ¹⁾	Jährliche Geschiebe-fracht ²⁾
	J_e	d_m	Q_0	G
	‰	mm	m ³ /s	m ³ /Jahr
Rhein	2,95	57	200	197000
Vorderrhein	4,30	53	90	246000
Hinterrhein	4,30	71	130	28000

¹⁾ Beginn des Geschiebetriebes

²⁾ Entsprechend mittlerem Transportvermögen

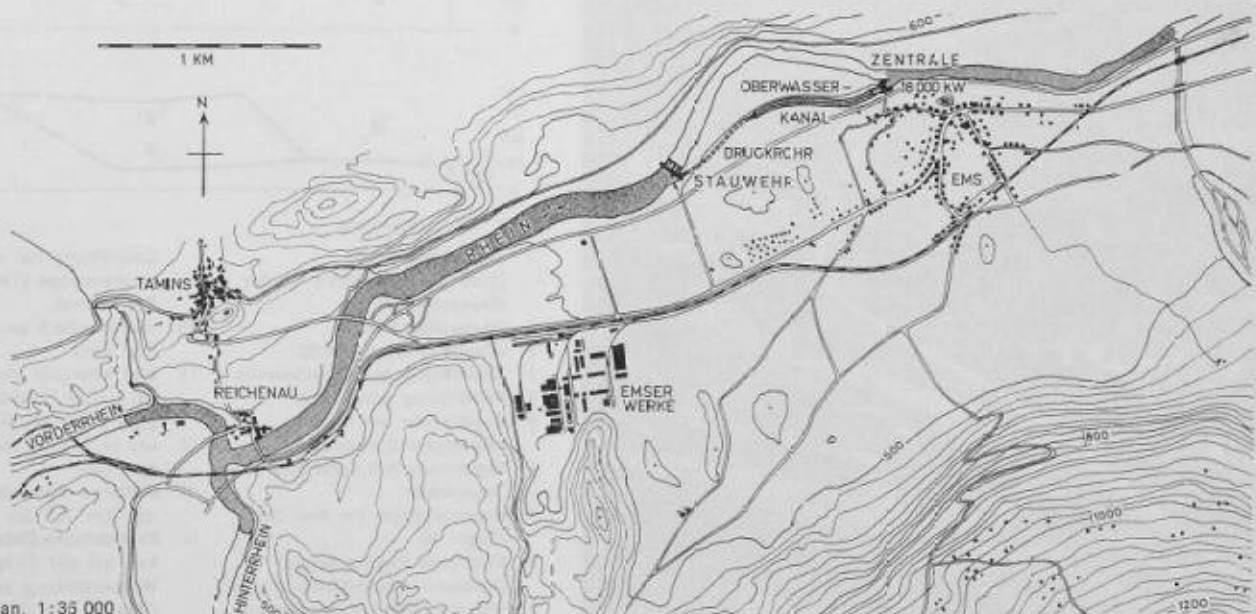


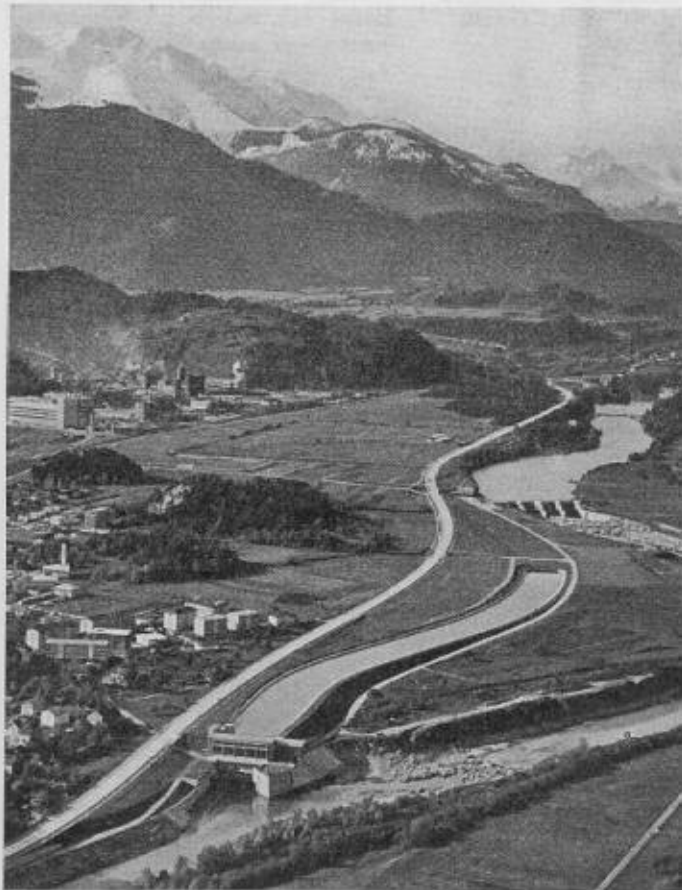
Bild 1. Lageplan, 1:35 000

eingetieft, entsprechend rund 6 cm pro Jahr. Mit Rücksicht auf diese Erosion wurde die Wasserrückgabe tiefer als üblich fundiert und zudem an eine Stelle gelegt, an der sich der Talweg des Rheins am rechten Ufer befindet; damit konnte das Nutzgefälle für kleine Wassermengen erhöht werden. Auch die Schwebstoffe, deren jährliche Menge auf rund 1,5 Mio m³ geschätzt wurde, sowie das reichlich vorhandene Geschwemmel mussten bei der Ausbildung zahlreicher Bauteile berücksichtigt werden.

3. Das Wehrréglement

Die vorgenannten flussbaulichen Gegebenheiten erforderten die Ausarbeitung eines besonderen Wehrréglementes. Dessen Hauptziel bestand darin, bleibende Geschiebeaufladungen im Stauraum zu verhindern. Bei solchen Aufładungen würden die Hochwasser mit zu hohen Spiegeln abfließen, und es würde eine erhöhte Sohlenerosion in der Flusstrecke unterhalb des Wehres auftreten. Dass das Réglement daneben eine möglichst grosse Energieproduktion des Kraftwerkes gewährleisten muss, ist selbstverständlich. Eingehende Studien führten zu der in Bild 3 dargestellten Lösung. Bei Geschiebebegang wird der Stau soweit abgesenkt, dass der Fluss das Geschiebe durch das Wehr ins Unterwasser weiterführen kann. Um beim Beginn des Geschiebebetriebes ($Q_0 \cong 200 \text{ m}^3/\text{s}$) das Beharrungsgefälle von 2,5‰ zu erreichen, müsste der Wasserspiegel am Wehr um etwa 7,5 m, das heisst von Kote 584,5 auf Kote 577,0 abgesenkt werden. Mit Rücksicht auf die anfänglich kleinen Geschiebemengen, die geringe Geschiebeablenkung bei der Wasserfassung und das nicht ausgenützte Transportvermögen der Staustrecke wird der Stau zunächst nur bis auf Kote 575,0 abgesenkt, das heisst es wird gegenüber dem Beharrungsgefälle ein Einstau von etwa 2 m beibehalten. Bei zunehmender Wassermenge wird der Stau fortlaufend bis auf die Minimalhöhe 578,0 abgesenkt, welches Niveau bei einem Zufluss von rund 450 m³/s erreicht wird. Damit ist das berechnete Beharrungsgefälle von 2,5‰ erstmals vorhanden. Alle Wassermengen unter 450 m³/s fliessen also mit zu kleinen Gefällen ab und führen zu Aufladungen im unteren Staubegebiet. Mit der Beibehaltung des Minimalstaus bis zu einer Wassermenge von 750 m³/s, bei welcher das Wasserspiegelgefälle bereits den Wert von 2,8‰ erreicht, und unter Beibehaltung dieses Gefälles für alle grösseren Abflüsse (bis 1500 m³/s) werden die vorhandenen Aufladungen infolge des überschüssigen Transportvermögens wieder abgebaut.

Bild 2. Gesamtbild des Kraftwerkes



Das Wehrréglement wurde aufgestellt unter der ausschliesslichen Berücksichtigung der flusseigenen Transportfähigkeit. Da jede Stauabsenkung Verluste an Leistung und Energie mit sich bringt, wurden, im Bestreben, die wirtschaftlich optimale Betriebsweise zu finden, auch die Auswirkungen eines Geschiebebaggerbetriebes geprüft. Dabei ging man von der Annahme aus, dass Stauabsenkungen erst bei grösseren Wassermengen erfolgen würden, was eine Verringerung des Transportvermögens des Rheines und damit Geschiebeablagerungen im oberen Teil des Staubebietes zur Folge hätte. Diese Ablagerungen würden mit Baggern abgebaut und das Material dem Fluss unterhalb der Wasserrückgabe des Kraftwerkes wieder zurückgegeben. Es zeigte sich, dass das wirtschaftliche Optimum tatsächlich mit einem zusätzlichen Baggerbetrieb erreicht werden könnte, und zwar dann, wenn der Stau erst bei einer Wassermenge von 300 bis 350 m³/s abgesenkt würde: Bei grösseren Wassermengen ist der natürliche, bei kleineren der künstliche Abtransport des Geschiebes billiger. Dies erklärt sich aus der verhältnismässig grossen Zeitspanne, während der die Abflussmengen zwischen 200 m³/s und 325 m³/s liegen (im Mitteljahr etwa 1000 Stunden) und aus der relativ kleinen Geschiebefracht, welche diesen Abflussmengen entspricht (rund 10000 m³/Jahr). Die Anzahl der Absenkungen würde um etwa ein Viertel verringert. Auf die Vorteile, welche ein Baggerbetrieb bietet, wurde aber mit Rücksicht auf das Landschaftsbild bei Reichenau verzichtet.

4. Grundwasserverhältnisse

Aus den langjährigen Aufzeichnungen bei mehreren Grundwasserbrunnen in der Ebene südlich des Staubebietes waren die Grundwasserverhältnisse in grossen Zügen bekannt. Ausgedehnte wasser-durchlässige Lockergesteinsformationen der Talsohle erlauben ein rasches Fließen des Grundwassers trotz verhältnismässig kleinen Gefällen. Durch einen unterirdischen Rückstau des talauswärts fliessenden Grundwasserstromes hat sich im Raume oberhalb des Dorfes Ems ein Grundwassersee gebildet, dessen höchster Spiegel,

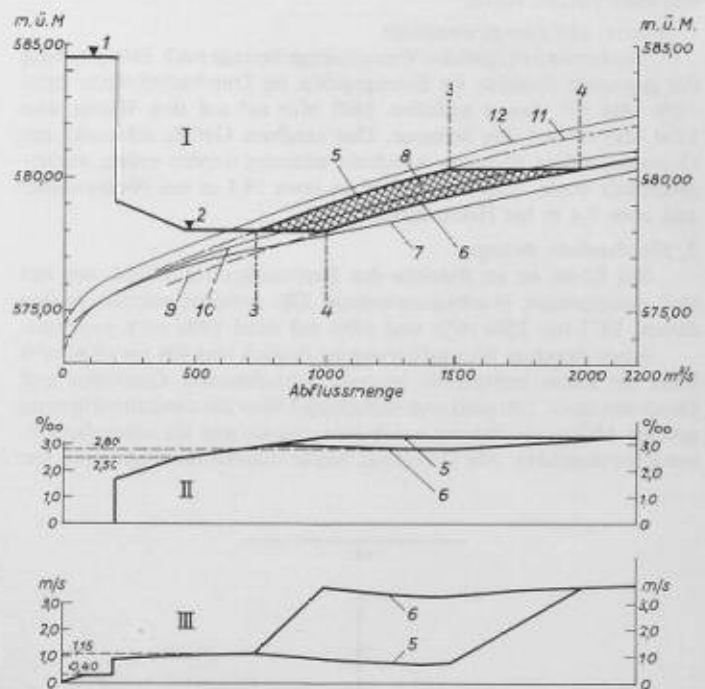


Bild 3. Wehrréglement

- | | |
|---|---|
| I Wehrrégulierplan
(Stau in Abhängigkeit von der Wassermenge) | Spülöffnung bei voller Betriebswassermenge (120 m ³ /s) des Kraftwerkes |
| 1 Normalstau 584,50 | 10 wie 9, jedoch bei abgestelltem Kraftwerk |
| 2 Minimaler Stau 578,00 | 11 Wehrkapazität ohne Spülöffnung bei voller Betriebswassermenge [120 m ³ /s] des Kraftwerkes |
| 3 Spülöffnung ganz geschlossen | 12 wie 1, jedoch bei abgestelltem Kraftwerk |
| 4 Spülöffnung ganz offen | II Mittleres Wasserspiegelgefälle von Km. 0,3 bis Km. 2,6 |
| 5 Regulierung mit höchstem zulässigem Stauspiegel | III Rechnerische Einlaufgeschwindigkeit bei der Ein aufschwelle der Wasserfassung auf Kote 574,50 (Pos. 4, Bild 7) |
| 6 Regulierung mit tiefstem möglichem Stauspiegel | |
| 7 Normalabfluss bei Km. 2,6 (Pegel 9) | |
| 8 Möglicher Regulierbereich (kreuzweise schraffierte Fläche) | |
| 9 Wehrkapazität einschliesslich | |

der im Sommer auftritt, noch unterhalb des Rheinspiegels liegt. Dieser See wird zusätzlich durch Hangwasser und Infiltrationen vom Rhein her gespeist, sobald der Wasserspiegel im Fluss über der kolmatierten Sohlenpartie liegt. Es musste damit gerechnet werden, dass durch den Einstau des Rheins auf einer rund 2,5 km langen Strecke der Grundwasserstrom durch die höher gelegenen durchlässigen Uferpartien sich stark vergrössern und dass sich der Grundwasserspiegel heben würde; wie viel, war nicht vorausszusehen. Für die Bemessung der im Bereich des Grundwassers liegenden Bauwerke mussten deshalb vorsichtige Annahmen in bezug auf den Grundwasserspiegel getroffen werden.

So ist zum Beispiel das oberste Teilstück des Oberwasserkanales nicht als offener Kanal sondern als Eisenbetonrohr ausgeführt worden, und zwar aus dem folgenden Grunde: Der im Wehrréglement vorgeschriebene Absenkvorgang muss, dem raschen Anstieg der Hochwasser entsprechend, in verhältnismässig kurzer Zeit vollzogen werden. Demgegenüber wird der Grundwasserspiegel nur langsam absinken, und aus der Differenz der beiden Wasserspiegel würden sehr grosse, auf die Betonverkleidung eines Kanals wirkende Auftriebskräfte entstehen. Kostenvergleiche ergaben, dass unter diesen Umständen ein geschlossener Kanal die wirtschaftlichere Lösung darstellt.

B. Beschreibung der einzelnen Anlageteile

1. Stauwehr und Wasserfassung, baulicher Teil

Die rechnerisch bestimmten Abmessungen der einzelnen Teile dieser Bauwerke wurden mit Hilfe von Modellversuchen überprüft. Dazu diente ein Modell im Massstab 1:70, welches das ganze Staugebiet, das Stauwehr mit Wasserfassung und die anschliessenden Fluss- und Kanalstrecken umfasste, Bild 4.

Dieses Modell ermöglichte zudem die Abklärung verschiedener Probleme. Davon seien erwähnt: Kontrolle des allgemeinen Strömungsbildes, Überprüfung des Wehrréglementes und der Energieverrichtung im Unterwasser. Besonders eingehend hat man die Wasserfassung untersucht, welche bei allen möglichen Betriebszuständen geschleisfrei bleiben muss. Aufgrund der Ergebnisse von Kolkversuchen wurde zum Beispiel das Wehr um rund 40 m flussaufwärts verschoben, da bei der ursprünglich vorgesehenen Lage Kolkzuschütze im Unterwasser von 12 t Gewicht nötig gewesen wären. Durch die Verschiebung konnte dieses Gewicht auf etwa 3,5 t verringert werden. Die Patvag Technik AG hat die Pläne dieses Modells entworfen. Unter ihrer Leitung ist es erstellt und betrieben worden.

Der Baugrund unter dem Stauwehr, der im Jahre 1957 durch elf Sondierbohrungen untersucht wurde, besteht im wesentlichen aus Bergsturstrümmern und Alluvionen. Fels wurde nirgends angetroffen. Eine Schicht zwischen den Koten 533,0 und 567,0 besteht aus kantigem kiesig-sandigem Material, durchsetzt mit tonig-lehmigen Anteilen, aber ohne grössere Blöcke. Die darüber liegende Schicht bis zur Flusssohle auf Kote rund 574,0 wird dagegen aus grobem Material mit grossen Blöcken gebildet. Aufgrund dieser Aufschlüsse konnte damit gerechnet werden, dass das Wehr in offener Baugrube erstellt werden könne.

Aus den Bildern 5 bis 7 sind die Form und die Abmessungen des Wehres, das am unteren Ende einer Linkskurve des Rheins liegt, ersichtlich. Massgebend für die konstruktive Durchbildung waren einerseits die flussbaulichen Bedingungen und andererseits die Weherschützen. Ein eingehender Kostenvergleich zwischen Tafel- und Seg-

mentschützen zeigte, dass eine Lösung mit Tafelschützen sowohl von der elektromechanischen als auch von der baulichen Seite her teurer sein würde als eine solche mit Segmentschützen. Auch in betrieblicher Hinsicht sind die Segmentschützen im Vorteil, indem ein hochgelegenes Drehlager wesentlich betriebssicherer ist als die teilweise im Flusswasser gelegenen Rollenkasten von Tafelschützen. Weiter bieten die Segmentschützen die Möglichkeit, öldrucktaugliche Hubwerke zu verwenden, was u. a. auch den Vorteil hat, dass die eher störungsanfälligen und wartungsintensiven Ketten wegfallen. Die Verwendung öldrucktauglicher Hubwerke ergibt zudem die Möglichkeit, die Wehranlage ohne störende Pfeileraufbauten zu erstellen, was sich in ästhetischer Hinsicht vorteilhaft auswirkt. Aus diesen Gründen fiel die Wahl auf Segmentschützen mit öldrucktauglichen Hubwerken.

Im Hinblick auf einen möglichst rationellen Betrieb ertschloss man sich, alle Schützen von einer zentralen Stelle aus zu steuern. Zu diesem Zwecke wurde am rechten Ufer in erhöhter Lage ein Wehrbedienungshaus erstellt, in welchem zudem noch einige Nebenanlagen untergebracht sind, die später dargestellt werden sollen. Für Montage- und Revisionszwecke sind oberwasserseitig der Schützen Dammbalken und unterwasserseitig ein mehr behelfsmässiger Nadelverschluss vorgesehen. Ein grosser Dammbalkenversetzkran, Bild 8, auf der oberwasserseitig angeordneten Wehrrücke bedient die Dammbalken. Der Nadelverschluss, Bild 9, wird mit einer demontierbaren Seilbahn ein- und ausgebaut. Die Dammbalken sowie die Elemente des Nadelverschlusses werden neben dem linken Widerlager deponiert.

Mit den drei Regulieröffnungen von je 18 m Breite, der zwölfmetrigen Spülöffnung und den drei 4 m breiten Pfeilern weist das Wehr eine totale Länge von 78 m auf. Obwohl auf einer Alluvion fundiert, ist es zusammen mit den Widerlagern ohne Dilatationsfugen ausgeführt worden.

Die grosse Stauhöhe von 10,0 m machte eine Verlängerung des Sickerweges gegen das Unterwasser notwendig. Diese Aufgabe übernimmt ein Dichtungsschirm aus Spundbohlen (Typ Larssen IV) unter der Wehrrschwelle, dessen Unterkante 19,0 m unter der Oberkante der Wehrrschwelle liegt. Am rechten Ufer ist der Schirm über das eigentliche Wehr hinaus weitergeführt bis zur Axe der Wasserfassung und folgt dann ein Stück weit dieser Axe. So bilden die Wasserfassung und das anschliessende Betondruckrohr eine Verlängerung des Dichtungsschirmes. Da sich der Untergrund in dieser Zone als sehr durchlässig erwies, musste der Dichtungsschirm von der Abwinkelung weg noch etwa 50 m weitergeführt werden.

Beim linken Widerlager wurde der Dichtungsschirm am Fuss der oberwasserseitigen Flügelmauer abgewinkelt und weitergeführt. So war es möglich, auch in dieser Zone mit verhältnismässig kleinem Aufwand die tieferen, durchlässigeren Schichten zu erreichen. Die Flügelmauer, die einen Teil des Dichtungsschirmes darstellt, ist entsprechend ausgebildet worden. An ihrem oberen Ende wurde der Dichtungsschirm noch etwa 25 m in das Ufer eingebunden.

Als weitere Massnahme, die bezweckt, die Tosbeckenplatte vom Auftrieb zu entlasten, sind insgesamt 14 Filterbrunnen von 10 m Tiefe am unteren Ende der Tosbecken erstellt worden. Diese Brunnen sind oben durch kräftige Deckel wasserdicht abgeschlossen. Sie entwässern sich ins Unterwasser durch einbetonierte Rohre, so dass sie auch bei trockenem Tosbecken ihre Funktion ausüben können. Die Wirkung dieser Filterbrunnen wurde von der Société Générale pour

Bild 4. Ansicht des Wehrmodells

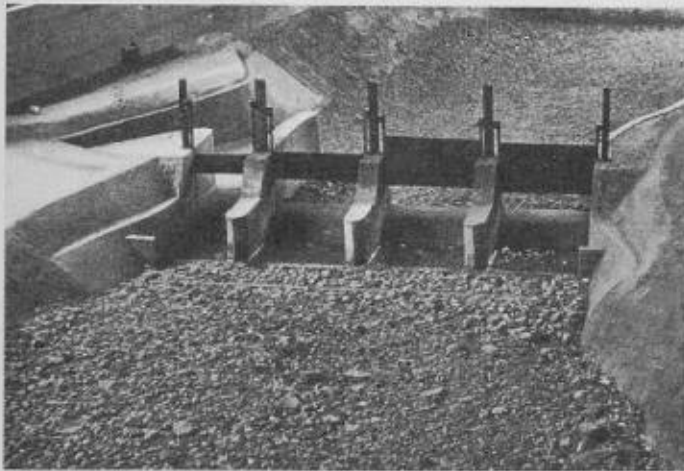


Bild 5. Gesamtbild des Wehres



l'Industrie in Gen^e an Hand von Modellversuchen abgeklärt. Diese Firma hat für sämtliche Betonkonstruktionen des Wehres die statischen Berechnungen ausgeführt und die zugehörigen Baupläne erstellt.

Zum Schutze vor Verschleiss durch das Flussgeschiebe wurden die drei 18 m breiten Weherschwellen, die Pfeilerköpfe 1 und 2 und ein Teil des linken Widerlagers mit einer Natursteinverkleidung versehen. Deren Stärke beträgt auf den Schwellen 50 cm und an den Pfeilern 40 cm. So sind alle diejenigen Flächen besonders geschützt, welche starkem Verschleiss ausgesetzt sind und bei welchen eine spätere Reparatur nur mit grossem Aufwand möglich wäre. Anders verhält es sich mit den Betonkonstruktionen unterhalb der Weherschützen. Diese

Partien sind zwar zum Teil auch stark exponiert; da aber während des ganzen Winterhalbjahres hier kein Wasser fliessen wird, können Reparaturen ohne Betriebseinschränkungen ausgeführt werden.

Für die Verkleidung wurde ein grünlicher, mässig geschieferter mittelkörniger Granitgneis aus Ausserferrera verwendet. Seine Druckfestigkeit in trockenem Zustand und senkrecht zum Lager beträgt rund 1500 kg/cm², die Prüfung der Zähigkeit (Schlagfestigkeit) senkrecht zum Lager ergab einen Zähigkeitsfaktor von 0,212. Vergleichsweise sei angeführt, dass von einer grösseren Anzahl über eine Reihe von Jahren verteilter Prüfungen der EMPA von verschiedenen Natursteinen der Zähigkeitsfaktor von 0,01 bis etwa 0,3 schwankte und im Mittel rund 0,09 betrug. Die Abnützungsprüfung senkrecht zum

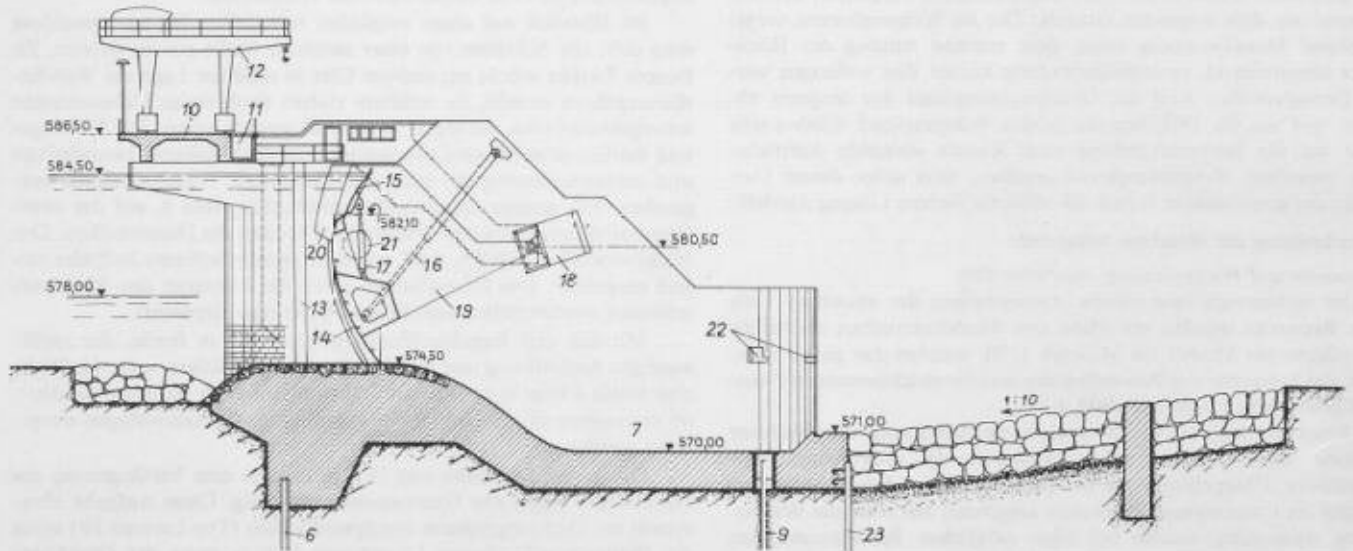


Bild 6. Schnitt durch eine Regulieröffnung, 1:400

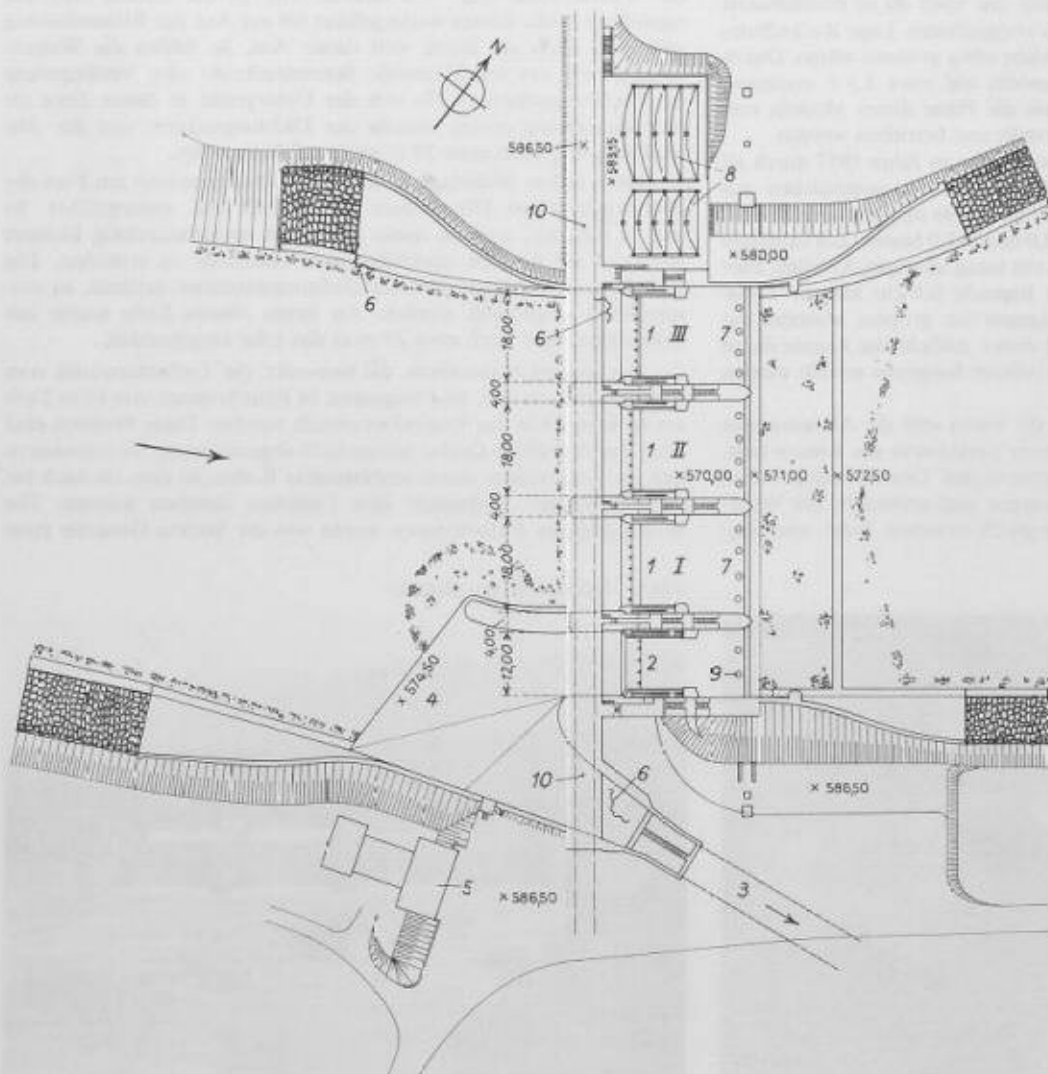


Bild 7. Grundriss der Wehranlage, 1:1500

- 1, II, III Regulieröffnungen
- 2 Spülöffnung
- 3 Oberwasser-Druckrohr
- 4 Einlaufschwelle der Wasserfassung
- 5 Bedienungshaus
- 6 Dichtungsschirm
- 7 Tosbecker
- 8 Dammbalkendepot
- 9 Füllkammer
- 10 Wehrbrücke
- 11 Leitungskanal
- 12 Dammbalken-Versetzkran
- 13 Dammbalkennischen
- 14 Schützenssegment
- 15 Regulierklappe
- 16 Antrieb zu 14
- 17 Antrieb zu 15
- 18 Auflagerkonsole aus Beton zum Drehlager von 14
- 19 Schützenstiel zu 14
- 20 Einlaufschwelle zu 15
- 21 Belüftungsöffnung
- 22 Auflager für Nadellehre
- 23 Spurdwand (Kolkschutz)

Tabelle 2. Ergebnisse der Abstützungsprüfungen des Verkleidungsmaterials

Abschleifen trocken		Abschleifen nass		Sandstrahlen	
Bestwert	Mittel	Bestwert	Mittel	Bestwert	Mittel
0,040	0,044	0,087	0,094	0,041	0,044
(0,03)	(0,07)	(0,10)	(0,15)	(0,015)	(0,08)

Lager ergab die Vergleichswerte der Tabelle 2. In Klammern sind Durchschnittswerte für Eruptiv- und metamorphe Gesteine angeführt.

Die Länge der Pfeiler wurde bestimmt einerseits durch die Form der Wehrschwelle und des Tosbeckens und andererseits durch den Platzbedarf der Schützen- und Dammbalkenkonstruktionen sowie den notwendigen Arbeitsraum zwischen diesen. Da zwei verschiedene Dammbalkensätze vorhanden sind, die mit dem gleichen Kran versetzt werden, und da weiter zwei verschiedene Schützentypen notwendig waren, deren Pressenaufhängungen aufeinander abgestimmt sind, wurde schliesslich der Minimalabstand zwischen den Dammbalken- und den Schützenarmaturen in der Spülöffnung für die Länge der Pfeiler massgebend.

Das ganze Auflager der Wehrbrücke wurde oberwasserseitig als Konsole ausgebildet und blieb deshalb ohne Einfluss auf die Länge der Pfeiler. Aus der konstruktiven Ausbildung der Seitendichtungen der Schützen ergaben sich unterhalb derselben Rücksprünge in den Wehrpfeilern. Deswegen rüsteten einerseits die unterwasserseitigen Pfeilerkörper schlanker und andererseits die Drehlagerkonsolen und Pressenaufhängungen weiter auskragend gebaut werden. Im schmäleren Teil der Pfeiler und Widerlager sind jeweils hinter den Drehlagern kleine Kavernen ausgespart, in welchen die Leitungen der öhydraulischen Hubwerke, der Schützenheizung und der Zentralschmierung durchgeführt und die Indikatoren der Schützenstellungsübertragung untergebracht sind.

An die beiden Widerlager ist am unteren Ende des Tosbeckens je ein vertikaler, oberwasserseitig gepanzertes Eisenbetonnocken vorhanden, der den Zweck hat, bei gewissen Abflussverhältnissen die Walze im Tosbecken zurückzuhalten, da sich diese, wie die Modellversuche gezeigt haben, ohne Nocken unterhalb des Tosbeckens gebildet hätte.

Die Wehrbrücke besteht aus mit den Pfeilern und Widerlagern monolithisch verbundenen Konsolträgern und dazwischenliegenden Einhängträgern. Sie wurde als Plattenbalken mit zwei Längsträgern konstruiert. Querträger wurden weggelassen, damit später noch Leitungen oder Kabel ohne Schwierigkeiten unter der Brücke verlegt werden können. Unterwasserseitig enthält die Wehrbrücke auf der ganzen Länge einen Kabel- und Leitungskanal. Dieser ist am rechten Ufer bis in das Bedienungshaus weitergeführt. Darin sind sämtliche Leitungen und Verbindungskabel zwischen dem Wehr und dem Bedienungshaus bzw. der Zentrale untergebracht.

Die Wasserfassung wurde in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Modellversuche konisch ausgebildet; sie geht unmittelbar nach der Wehrbrücke in das anschliessende Betondruckrohr über. Nur bei vollständig abgesenktem Stau (Kote 578,00 gemäss Wehrreglement) fliesst das Wasser im Rohr mit freiem Spiegel ab.

In die oberwasserseitige Böschung ist am rechten Ufer das zweistöckige Bedienungshaus eingebaut. Der erste Stock, auf der Höhe des oberwasserseitigen Erdbodens gelegen, enthält den Kommandoraum, von dem aus die ganze Wehranlage und die untersten rund 800 m des Staugebietes überblickt werden können. Weitere Räume in diesem Geschoss sind: der Maschinenraum mit dem Öltank und dem für den Antrieb aller Schützen gemeinsamen Hubwerkaggregat, der Hochspannungsraum mit Transformatoren und Schaltzellen sowie der Batterieraum. Die Schalttafel der Niederspannungsverteilung bildet die Trennwand zwischen dem Maschinenraum und dem Raum mit der Notstromgruppe. Im Erdgeschoss sind neben Garderobe und Toilette ein Magazin und eine Werkstatt untergebracht. Oberwasserseitig schliesst das Wohnhaus des Wehrwartes an das Bedienungshaus an.

2. Die elektromechanischen Anlagen des Stauwehres

Wie bereits erwähnt, sind ein Satz *Dammbalken* für die drei Hauptöffnungen zu je 18 m lichter Weite und ein zweiter Satz für die Spülöffnung mit 12 m lichter Weite vorhanden, Bild 10. Der zweite Satz dient auch als Abschluss der Wasserfassung. Die beiden Dammbalkensätze werden vom gleichen Versetzkran bedient, was nur möglich ist, wenn die Schwerpunkte sämtlicher Dammbalkenelemente in einer Ebene liegen. Die Stauwand der Dammbalkenelemente bildet

gleichzeitig einen Teil des Druckgurtes der parabelförmigen Hauptträger. Diese Kombination erwies sich als sehr wirtschaftlich. Als weitere Vorteile der parabelförmigen Stauwand können erwähnt werden: Die Verringerung der Ausladung des Versetzkranes infolge der oberwasserseitigen Schwerpunktlage; der Montageplatz zwischen Dammbalken und Schütze erhält mehr Licht, und es besteht die Möglichkeit, am offenen Fachwerk der Zuggurte Gerüste und Leitern zu befestigen. Dagegen wirkte sich die parabelförmige Schwellenarmatur auf die natursteinverkleideten Wehrschwellen preislich nachteilig aus.

Alle drei Schwellen der Hauptöffnungen liegen auf Kote 574,50. Mit einem Freibord von 20 cm über dem Stauziel von 584,50 ergibt sich somit eine totale Höhe dieses Dammbalkensatzes von 10,20 m. Er besteht aus fünf gleich hohen Elementen. Das schwerste weist ein Gewicht von 15,7 t auf. Nur die obersten zwei sind mit Rollen versehen, damit der Zwischenraum zwischen der Schütze und der Dammbalkenwand auch bei abgesenktem Stau durch Ziehen von einem oder zwei Elementen vom Oberwasser her gefüllt werden kann.

Die Elemente sind zur Hauptsache aus Stahl 37 in geschweisster Konstruktion ohne Montaggestösse ausgeführt, die Blechstärke der Stauwand variiert zwischen 18 und 10 mm. An zwei Punkten, die 8 m auseinanderliegen, können die Elemente am Versetzkran aufgehängt werden. Das Fachwerk ist an diesen Stellen entsprechend verstärkt, und die unterwasserseitigen Pfosten werden jeweils auf die unteren abgestellt. Die auf diese Art gebildeten durchgehenden vertikalen Stützen sind auf zwei, in die Schwelle einbetonierte Stahlplatten aufgelagert. Diese Stützen sind als Doppel-U-Hohlträger ausgebildet und können zur Ausbalancierung der Elemente mit Ballast gefüllt werden. Es wurde dafür gesorgt, dass die Oberwasserseite zunächst etwas schwerer wurde als die Unterwasserseite. Die definitive Ausbalancierung wurde erst nach der Rostschutzbehandlung vorgenommen.

Die Auflagernischen in den Pfeilern sind rund 60 cm breit und rund 35 cm tief. Eine einbetonierte Rohrleitung ermöglicht ein Spülen der Schwellen im Bereiche der Nischen. Auf den oberwasserseitigen Kantenschutzwinkel gleitet eine Gummidichtung aus Wulstprofil. Die unterwasserseitige Kante ist durch ein kräftiges Winkeleisen verstärkt, um mechanische Beanspruchungen aufnehmen zu können.

Die Dammbalkenschwelle der Spülöffnung liegt auf Kote 573,62, so dass die Höhe des ebenfalls aus fünf gleich hohen Elementen bestehenden Satzes hier 11,08 m beträgt. In der Wasserfassung liegt die Schwelle noch tiefer, nämlich auf Kote 572,10. Die Oberkante der Dammbalken reicht demnach bis auf Kote 583,18, was aber genügt, um den trockengelegten Teil auch bei Hochwasser vor Überflutung zu schützen.

Für beide Dammbalkensätze kann der gleiche Zangenbalken verwendet werden, indem ein 12 m langes Mittelstück beiseitig durch je ein drei Meter langes Einpass-Stück auf 18 m verlängert werden kann. Der Zangenbalken besteht aus einer normalen Fachwerkkonstruktion; wegen der oberwasserseitigen Schwerpunktlage der Dammbalkenelemente mussten die in die Nuten eingreifenden Führungen konsolartig vorgebaut werden. Diese Führungen sind mit je zwei oberwasserseitigen und zwei unterwasserseitigen Rollen versehen. Für die seitliche Führung sorgen Kufen.

Den Transport zwischen dem Dammbalkendepot am linken Ufer und den Wehröffnungen sowie das Einsetzen der Elemente besorgt ein besonderer *Dammbalkenversetzkran*, dessen Gerüst als Dreibein ausgebildet ist. Sämtliche Tragelemente sind als luftdicht geschlossene, geschweisste Kasten konstruiert. Der Kran ist für eine Nutzlast von 32 t bemessen. Das Traggerüst ist auf zwei untere Fahrwerkboxen aufgeschraubt, in welchen ausser den Fahrwerkboxen noch die Schienenzangen, die Federkabeltrommel, die Apparatekasten usw. untergebracht sind. Ein oberwasserseitiges und zwei unterwasserseitige Rollenpaare, welche in Wippen gelagert sind, bilden das Fahrwerk. Von den unterwasserseitigen wird ein Paar angetrieben. Der Antrieb erfolgt vom Motor über eine elastische Kupplung mit Doppelbackenbremse und ein im Ölbad laufendes Präzisions-Schneckengetriebe auf ein offenes Zahnradvorgelege und von hier auf die Laufäder. Mit einem fünfstufigen Controller kann die Fahrgeschwindigkeit «vorwärts» und «rückwärts» reguliert werden.

Die unterwasserseitige Schienenzange kann mit einem Handrad bedient und mit einem Endschalter derart gesichert werden, dass das Fahrwerk nur bei offener Schienenzange und das Hubwerk nur bei geschlossener Schienenzange betätigt werden können. Diese Manipulationen erfolgen von einem offenen Stand aus. Zwei Scheinwerfer sorgen für ausreichende Beleuchtung des Arbeitsplatzes während der Nacht.



Bild 8. Dammbalkendepot mit Versetzkran

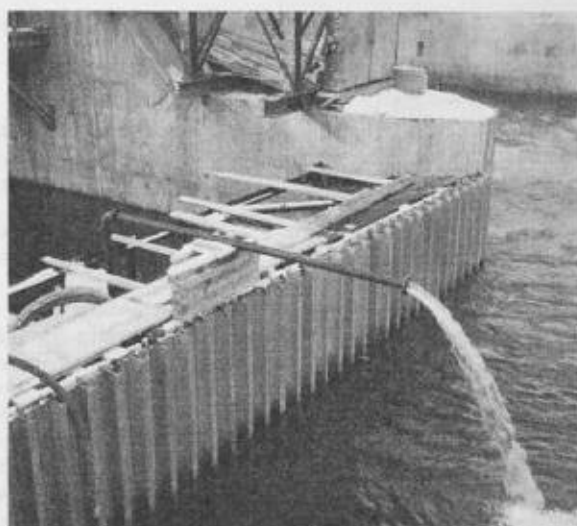


Bild 9. Unterwasserseitiger Nadelsverschluss

Die Einrichtungen des *Dammbalkendepots* sind konventioneller Art. Für das Verschieben und Absetzen der Elemente sind zwei Verschiebewagen mit ölhydraulischen Hubwerken und Handpumpe vorhanden. Jedes Element ist auf drei Punkten abgestellt.

Während mehrerer Monate wird im Winter das gesamte Wasser des Rheins genutzt, und die Unterwasserseite des Wehres ist dann trocken. Für die Inspektion und Revision der Schützen und Betonkonstruktionen hätte deshalb auf einen *unterwasserseitigen Abschluss* verzichtet werden können. Da jedoch für die Montage von drei der vier Schützen ein solcher Abschluss notwendig war, entschloss man sich für eine permanente Anlage. Diese ermöglicht eine Verlängerung der Winterperiode, während welcher Revisionen ausgeführt werden können, auf etwa $5\frac{1}{2}$ Monate und zwar von Mitte November bis Ende April.

Nach eingehender Prüfung mehrerer Varianten fiel die Wahl auf einen Verschluss, der aus vertikal gestellten Leichtmetallnadeln aus Anticorodal B, hartvergütet, besteht. Als unteres Auflager dient eine armierte Nut in der Schwelle, und als oberes ein Dreigurträger aus Stahlrohren, Bild 9. Dieser Träger wird zwischen vorstehenden Auflagernocken an den Pfeilern eingehängt und überträgt die horizontalen und vertikalen Kräfte auf diese Nocken. Die Länge der Nadeln beträgt 4,50 m, das Gewicht des grossen Profils 36 kg, dasjenige des kleinen dagegen nur 14,5 kg. Dank diesem kleinen Gewicht lassen sich die Nadeln von Hand transportieren und einsetzen. Sie werden oben mit Klemmbügeln an der Nadellehne festgehalten.

Das schwerste Stück des Abschlusses ist der Dreigurträger. Er wiegt 3,25 t. Für seinen Transport vom linken Ufer bis zur Einsatzstelle dient eine Seilbahn, die quer über den Rhein in der Schweraxe des Trägers installiert wird. Für den Quertransport sowie für die Hub- und Senkbewegungen werden eine Hand-Seilwinde und Kettenzüge verwendet. Die ganze Seilbahn ist demontierbar; sie wird mit den Nadeln in einem Depotraum am linken Widerlager aufbewahrt, während man die Nadellehne im Freien abstellt.

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die Überlegungen beschrieben, die zur Wahl von *Segmenten* mit *ölhydraulischen Hubwerken* führten¹⁾. Im Laufe der Projektierung musste eine ganze Reihe weiterer Punkte abgeklärt werden. Davon seien genannt:

a) Die Frage, ob die Hauptträger als Fachwerk- oder Vollwandkonstruktion ausgeführt werden sollten, wurde zugunsten der vollwandigen Ausführung entschieden, obwohl die Fachwerklösung etwa 3,5% weniger gekostet hätte. Bei der Spülschütze war ausserdem der Umstand massgebend, dass die Träger in direkte Berührung mit dem strömenden Wasser kommen. Daneben waren die wesentlich grössere Torsionssteifigkeit und der einfachere Unterhalt für den Entschluss zugunsten des Vollwandträgers ausschlaggebend.

b) Hinsichtlich der Wahl der zu verwendenden Stahlqualitäten entschloss man sich zunächst für St 37, Brückenbauqualität, obwohl eine Kombination von St 37 mit 20 + 30% St 44 nicht teurer geworden wäre. Es zeigte sich dann aber, dass die Verwendung von hochwertigen Stählen mit grösserer Kerbschlagzähigkeit bei tiefen

¹⁾ Eine eingehende Beschreibung der Wehrverschlüsse findet sich in den «Mitteilungen über Forschung und Konstruktion im Stahlbau», Heft 33 vom September 1965, Verlag Leemann, Zürich.

Temperaturen (Betrieb bei -30°C) in der Zugzone unerlässlich ist. Dementsprechend wurden in diesen Zonen Sonderstähle verwendet.

c) Untersucht wurde weiter die Frage, ob die Regulierringe mit exzentrischer Blechhaut ausgeführt werden sollten oder nicht. Die Prüfung ergab, dass die exzentrische Ausführung grosse Einsparungen bei den Hubwerkkosten ermöglichte, weshalb man sich für diese entschloss. Dabei nahm man den Umstand in Kauf, dass an den Enden der Schwelle die Strömungsverhältnisse bei leicht angehobener Schütze etwas ungünstiger werden. Die Exzentrizität wurde so gross gewählt, dass das Eigengewicht der Schützen ohne Wasserdruck für die Bemessung der Hubwerke massgebend wurde.

d) Die Dreihlager wurden so hoch angeordnet, dass sie nur bei extrem hohen Wasserständen mit dem Wasser in direkte Berührung kommen können. Abgesehen vom Schmutz, der in die Lager eindringen könnte, bleiben Holzstämmen und dergleichen erfahrungsgemäss tagelang im Bereich der Tosbeckenwalze und somit auch des Dreihlagers, was zu mechanischen Beschädigungen führen könnte.

Von den drei als Segment-Klappen-Schützen ausgeführten Regulierringen seien die folgenden Daten genannt:

Lichte Weite im Oberwasser	18,00 m	
Höhe einschliesslich 10 cm Freibord	10,10 m	
Radius der exzentrischen Blechhaut	10,00 m	
Klappenbreite	16,60 m	
Absenkhöhe der Klappe	2,40 m	
Je zwei Pressen für	Klappe	Segment
Kolbendurchmesser	mm	300
grösste Hubkraft	t	125
Öldruck	at	238
mittlere Hubgeschwindigkeit	cm/min etwa	66 ¹⁾ 25,5 ²⁾

¹⁾ an Klappenoberkante

²⁾ an Schützenunterkante

Die Schützenstiele und die Seitenschilder sind luftseitig vollwandig ausgeführt; die Schilder sind in der Grösse so bemessen, dass der maximal überfallende Wasserstrahl in jeder Klappenlage seitlich geführt ist. Sie dienen den Hubwerkspressen zudem als Schutz. An den Schildern sind pfeilerseitig Leitern befestigt, die es erlauben, von der Schützenoberkante bis zur Schwelle hinunterzusteigen. Die seitlichen Einlaufschilder im Bereich der Klappe sind in der Fließrichtung abgerundet und in der Seitenansicht polygonal.

Die Klappe ist mit Scharnieren am Segment befestigt. Da sich die Schütze unter dem Wasserdruck durchbiegt, könnte sich ein normales Scharnier in bestimmten Lagen verklemmen. Bei der konstruktiven Durchbildung der Scharniere wurde diesen Umständen Rechnung getragen. Die abgelegte Klappe kann bei Vollstau eine Wassermenge von rund $110\text{ m}^3/\text{s}$ abführen, wobei der Überfallstrahl durch seitliche Öffnungen im Stiel und durch Strahlbrecher an der Klappenkante belüftet wird.

Das Segment kann unabhängig von der Lage der Klappe und des Oberwasserstandes gehoben werden; seine Stauwand weist eine Blechstärke von 14 bis 16 mm auf. Im untersten Teil von rund 1,5 m Höhe wurde ein 25 mm starkes Blech aus St 52 verwendet, das in der Lage ist, eine dazu senkrecht auftretende Einzellast von 10 t zu übertragen.



Bild 10. Spülöffnung



Bild 11. Spülöffnung (links) und Regulieröffnung (rechts)

Der unterste Teil der Schütze ist als kastenförmiger Träger ausgebildet, welcher das ganze Schützensgewicht auf einen einzigen Auflagerpunkt übertragen kann, wenn die Schütze nicht auf der Wehrschwelle sondern auf einem Fremdkörper (z. B. Felsblock oder Baumstamm) aufliegen sollte. Der Hauptträger der Schütze ist ebenfalls als wasserdicht geschlossener Kasten ausgebildet.

Alle Seiten- und Schwellendichtungen haben rund 8 mm Vorspannung. Wegen der Deformation der Schütze unter Wasserdruck, die ein leichtes Abheben von der Schwelle bewirkt, musste die Vorspannung in Schwellenmitte grösser gemacht werden als an den Seiten. Für die Dichtungen wurde synthetischer Gummi verwendet. Die in der Wehrschwelle einbetonierten Armaturen sind mit einer 40 mm starken, auswechselbaren Verschleissplatte versehen.

Die seitlichen Gummidichtungen, die auf rostfreien Pfeilerarmaturen gleiten, haben im Normalfall auch die Aufgabe, die Schützenkonstruktion seitlich zu führen. Für die Aufnahme von grösseren quergerichteten Kräften ist beidseitig des Schützenkörpers je eine Kufe vorhanden, die ebenfalls auf einer einbetonierten Armatur gleiten kann.

Die als reine Zugpressen ausgebildeten Segmenthubwerke sind an den Kastenträgern in der Nähe ihrer Schwerachsen mit Zapfenlagern befestigt. Oben sind die Zylinder an über den Pfeilerrücken durchgehenden Armaturen aufgehängt. Da die oberen Pressenräume zur Verhinderung von Rostbildung mit Öl unter geringem Überdruck gefüllt werden, und weil die Schützen bei extrem hohen Unterwasserständen wegen der wasserdicht geschlossenen Hauptträger bei falscher Bedienung ins Schwimmen geraten können, mussten die Hubwerke und die oberen Armaturen für eine Stosskraft von rund 5 t bemessen werden. Mit diesen Hubwerken können die Schützen um 8,50 m gehoben werden. Die Schützenunterkanten befinden sich dann auf Kote 583,00, das heisst rund 2 m über dem höchsten Hochwasserspiegel. Mit Rücksicht auf Verschleiss und Ausführungstoleranzen wurden die Hubwerke so ausgebildet, dass die Schützen theoretisch bis 5 cm unterhalb der Schwellenoberkante abgesenkt werden könnten. In der tiefsten Lage misst der Hebelarm der Pressen 4492 mm, in der höchsten dagegen 4800 mm.

Die Pressenzylinder wurden aus einem einzigen Werkstück aus Stahl 55/29 hergestellt. Im Hinblick auf die Dichtigkeit der unter grossem Druck stehenden Zylinder wollte man deren grösste Dehnungen möglichst klein halten. Dies führte dazu, dass man die Zugspannungen trotz dem hochwertigen Material auf rund 1200 kg/cm² beschränkte.

Die Schütze in der Spülöffnung, Bild 12, wurde als Doppelsegmentklappenschütze gebaut. Ihre wichtigsten Daten sind:

Lichte Weite im Oberwasser	12,00 m
Höhe einschliesslich 10 cm Freibord	11,10 m
Grösster Radius der Unterschütze	11,50 m
Grösster Radius der Oberschütze	11,00 m
Klappenbreite	10,28 m
Absenkhöhe der Überlaufklappe	3,00 m
Absenkhöhe der Oberschütze	rund 3,50 m

Massgebend für die dreiteilige Ausführung dieser Schütze war die Forderung, dass auch bei maximal abgesenktem Stauspiegel ein

Überströmen zur Wegführung des Geschwemmels möglich sein muss. Im Hinblick auf das gemeinsame Antriebsaggregat und auf ein einheitliches Aussehen wurde die Spülschütze nach den gleichen Grundsätzen wie die Regulierschütze konstruiert, weshalb die Beschreibung der Konstruktion der Regulierschützen auch hier weitgehend gültig ist. Einige, nur die Spülschütze betreffende Punkte sollen hier noch kurz erwähnt werden:

a) Die dreiteilige Schütze besteht aus einer Unterschütze US, einer Oberschütze OS und einer auf dieser aufgesetzten Klappe K. Weil die OS hinter die US abgesenkt wird, musste der Träger der US oberwasserseitig angeordnet werden.

Der US sind beiseitig zwei «Hörner» 2 aufgesetzt, an welchen im Oberwasser die seitlichen Dichtungen zwischen den US und den Pfeilern, und unterwasserseitig die Dichtungen zwischen der US und der OS angeordnet sind. Zusätzlich übernehmen die Hörner die gleiche Aufgabe wie die Einlaufschilde der Regulierschützen: sie führen das Wasser in das verschmälerte Profil der Klappe.

b) Die Form des vollwandigen Schützenkörpers der US mit der Schneide 12 konnte angesichts der hydraulisch unübersichtlichen Verhältnisse nur an Hand von Modellversuchen zuverlässig abgeklärt werden. Dabei wurde gleichzeitig auch die Grösse der Hubkräfte ermittelt. Ausserdem gaben die Modellversuche Aufschluss über die erforderliche Belüftung des Überfallstrahles bei den verschiedensten Betriebsverhältnissen. Es erwies sich als notwendig, die in den Seitenschildern der OS vorgesehenen Belüftungslöcher 8 an der Aussen- seite der Schilder kaminförmig hochziehen, um die Luftansaugöffnung jederzeit über Wasser zu halten.

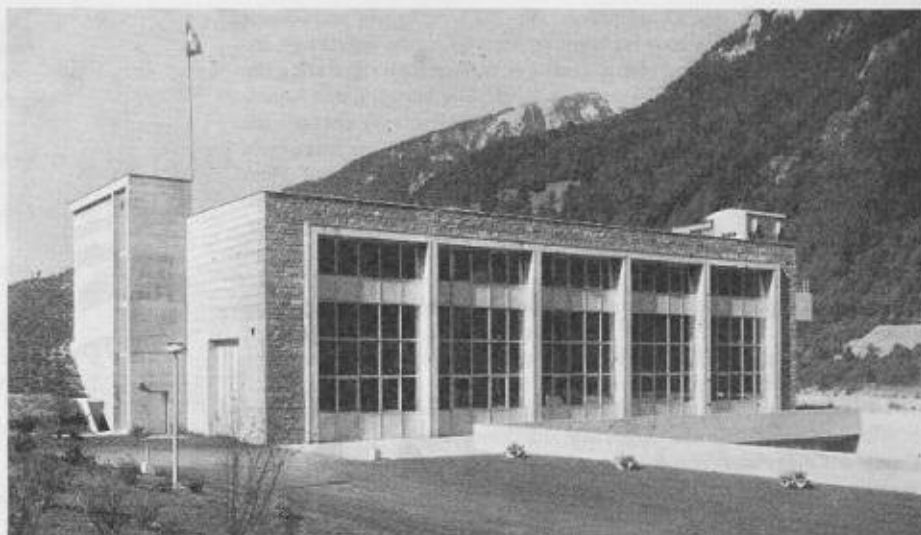
c) Die OS und die US haben als Hubwerk je ein unabhängiges Pressenpaar. Um zu verhindern, dass bei einem Versagen der Steuerung die beiden Schützen auseinanderfahren oder dass die US gegenüber der OS zu weit hinaufgezogen wird, ist eine gegenseitige, mechanische Verriegelung vorhanden. In besondern Fällen kann es deshalb vorkommen, dass die Hubwerkpressen der OS durch das Heben der US, oder die Hubwerkpressen der US durch das Heben der OS eingestossen werden. Um in diesen Fällen Unterdruck und ein Ansaugen von Luft in den Hochdruckteil zu verurteilen, wurde dafür gesorgt, dass das verdrängte Füllöl über ein Rückschlagventil in das Hochdrucksystem gelangen kann.

d) Im Gegensatz zu den Regulierschützen wird hier die seitliche Führung zwischen den Hörnern und den Pfeilern beidseitig durch je zwei Führungsrollen besorgt. Das komplizierte Schützensystem und die Deformationen bei den verschiedenen Betriebszuständen machten diese bessere Führung notwendig. Für die seitliche Führung zwischen der US und der OS sind dagegen Kufen eingebaut.

e) Die vollwandigen Hauptträger der OS und der US weisen zum Teil oben und unten angeordnete, vergitterte Öffnungen auf, welche eine freie Wasserzirkulation gestatten und damit den Auftrieb beim Einstau von der Unterwasserseite her verringern. Die Träger kommen so auch im eingetauchten Zustand nicht zum Schwimmen.

f) Um Zwängungen auszuschliessen, wurden die beiden Sektorpressenpaare am Pfeilerrücken mit zwei Doppel-Kardangeln 13 aufgehängt.

Im Bedienungshaus am rechten Ufer ist, wie bereits erwähnt, das



wegungen über ein weiteres Gestänge auf die Klappe des Indikators übertragen.

Bei der konstruktiven Ausbildung musste dabei auf die axialen Spiele der Schützendrehlager Rücksicht genommen werden. Die Lager der Übertragungsvorrichtungen sind gegen Verschmutzung abgedichtet und zudem mit Schmiernippeln ausgerüstet. Bei der Schütze in der Spülöffnung wurden die Indikatoren im Prinzip gleich ausgebildet. Die senkrechten Verschiebungen der Ober- und Unterkanten der Indikatoren werden mit Hilfe von Abtastlinealen und Metallitzen direkt auf die danebenstehenden Kontaktgeber übertragen.

Die Wehrschützen werden von der Zentrale aus automatisch gesteuert. Daneben ist Handsteuerung möglich, und zwar in den Pfeilerhäuschen, im Wehrbedienungsraum und in der Zentrale. Im Wehrbedienungsraum können die Steuerungsimpulse von der Zentrale, im Pfeilerhäuschen diejenigen von der Zentrale und vom Wehrbedienungsraum ausgeschaltet werden. Anzeigevorrichtungen an den drei Bedienungsstellen orientieren über die wichtigsten Reguliervorgänge.

Die für den Rostschutz verwendeten Materialien sind: Bitumen (dort wo kein Öl vorhanden ist, wie z. B. Dammbalken, Nadellehne, kleine Hohlräume der Schützenkonstruktion), Chlorkautschukfarben (Schützen, Krananlagen usw.) und Ölfarben (Schaltschränke).

Interessant ist die Rostschutzbehandlung der Stahlkonstruktionen. Für die Schützen wurde zur Hauptsache Material auf Chlorkautschukbasis verwendet, und zwar in folgenden vier Typen:

Typ 1. Normalausführung für die ständig benutzten Flächen, die wasserseitigen Flächen der Seitenschilder und der Stiele sowie die beweglichen Seitendichtungselemente. Im Werk: Sandstrahlung, Spritzverzinkung (0,16 bzw. 0,22 mm²), zweimaliger Grundanstrich mit Mennige rot, einmaliger Deckanstrich grau, bei der Montage einmaliger Deckanstrich grau.

Typ 2. Spezialausführung für ständig benutzte und unterwasserseitige Flächen: 1,5 m breiter Streifen an der Schwelle (OW+UW) und Oberschütze in der Spülöffnung (ohne Schilder). Im Werk: Sandstrahlung, Spritzverzinkung (0,20 bzw. 0,26 mm), dreimaliger Grundanstrich mit Mennige rot, einmaliger Deckanstrich grau, Montage: einmaliger Deckanstrich grau.

Typ 3. Normalausführung der unterwasserseitigen Aussenflächen der Schützenkörper, luft- und pfeilerseitige Flächen der Seitenschilder und Stiele. Im Werk: Sandstrahlung, Spritzverzinkung (0,10 bzw. 0,14 mm), einmaliger Grundanstrich mit Mennige, einmaliger Deckanstrich grau, Montage: einmaliger Deckanstrich grau.

Typ 4. Wandflächen der begehbaren Hohlräume der Schützenkörper. Im Werk: Sandstrahlung, Spritzverzinkung (0,08 bzw. 0,10 mm), einmaliger Grundanstrich mit Mennige, einmaliger Deckanstrich grau, Montage: einmaliger Deckanstrich grau.

Die Spritzverzinkung wurde durch die EMPA kontrolliert. Es hat sich dabei gezeigt, dass die vorgeschriebenen Schichtstärken mit erstaunlicher Genauigkeit gespritzt werden können. Nur ausnahmsweise wurden die Minimalstärken unterschritten, die vorgeschriebenen Mittelwerte dagegen nie.

²⁾ Die erste Zahl gibt die minimale Stärke an, die zweite die mittlere Stärke

Die Dammbalken und der Zangenbalken des Stauwehres erhielten folgende Rostschutzbehandlung: Im Werk: Sandstrahlung, zweimaliger Grundanstrich mit Bitumen, gefiltert. Nach der Montage der Schützen: zweimaliger Bitumenanstrich.

Die elektrischen Einrichtungen des Stauwerkes weisen drei voneinander unabhängige Anlagen für die Stromspeisung auf:

a) Normalspeisung ab einer der zwei längsgeteilten 11-kV-Sammelschienen im Maschinenhaus, die selber wiederum zwei Einspeisungsmöglichkeiten besitzen. Bei deren Ausfall erfolgt automatische Umschaltung auf

b) Speisung ab 10-kV-Sammelschienen in den Emser Wecken über ein besonderes Kabel und eine eigene Freileitung mit dauernder Schaltbereitschaft. Sollte auch diese Anlage versagen, dann steht als letzte noch

c) die Notstrom-Dieselanlage zur Verfügung, welche von Hand am Ort eingeschaltet werden kann. Dabei muss die Wehrsteuerung jeweils auf eine einzige Wehröffnung beschränkt werden.

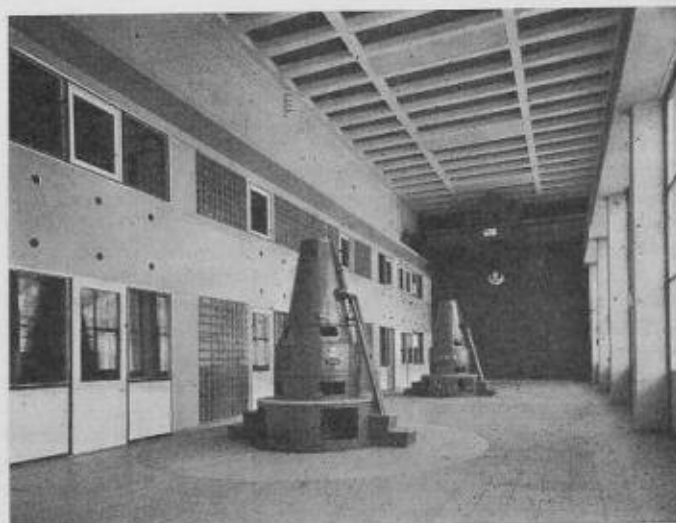
Die 11-kV-Anlage umfasst zwei Sammelschienen und zwei Transformatorsysteme, damit die automatischen Übergänge von Einspeisung a) auf b) und b) auf a) möglich sind. Jedem Sammelschiensystem, das vom Maschinenhaus her gespeist wird, ist ein 160-kVA-Transformator für die Schützenheizung angeschlossen.

Die Niederspannungsverteilung weist keine aussergewöhnlichen Teile auf. Dasselbe kann von der Gleichstromanlage (48 V, 60 Ah) gesagt werden, die ausschliesslich für die Fernsteuerung der Wehrschützen verwendet wird. Falls diese Gleichstromanlage versagen sollte, kann eine 220/380-V-Schützensteuerung an Ort und Stelle von Hand in Betrieb gesetzt werden.

3. Druckrohr und Oberwasserkanal

Die Anordnung dieser Anlagenteile ist bereits im Zusammenhang mit dem Wehrreglement und dem Grundwasser beschrieben und begründet worden. Zwei typische Querprofile sind in Bild 13 dargestellt.

Bild 15. Blick in den Maschinenraum der Zentrale



Das Sohlgefälle des Druckrohres von 7,15 m Innendurchmesser beträgt 1,0 ‰. Bemerkenswert beim Druckrohr ist die tiefe Lage, die bedingt ist durch die Forderung, auch bei tiefster Stauabsenkung die volle Betriebswassermenge fassen zu können. Die Neigung der Kanalböschungen von 4:5 ist aussergewöhnlich gross, hat sich aber als die wirtschaftlichste Lösung erwiesen. Bei Vollstau beträgt die maximale Wassergeschwindigkeit im Kanal nur rund 0,6 m/s, bei abgesenktem Stauspiegel 2,6 m/s.

Im Druckrohr wurden alle 17,6 m Dilatationsfugen angeordnet, welche mit Kupferblechen abgedichtet sind. In den Kanalböschungen sind beidseits alle 200 m Treppen eingebaut. Die Betonplatten der Böschungen sind in Abschnitte von rund $8,0 \times 8,5$ m unterteilt; die Fugen wurden mittels Sagex-Streifen ausgespart und nachträglich mit Bitumen ausgegossen. Ein rund 30 m langes trompetenförmiges Übergangsstück bildet die Verbindung von Druckrohr und Kanal.

Ein zweites Übergangsstück führt das Betriebswasser vom Kanal in die Wassereinflüsse der Zentrale. An dessen oberem Ende ist ein Entsander eingebaut, der den Zweck hat, das mit Sand angereicherte Wasser direkt über der Kanalsohle abzuführen. Bei abgesenktem Stau beträgt die grösste Spülwassermenge rund $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Durch einen sehr kräftigen, über die ganze Sohlenbreite reichenden Grobrechen gelangt das Wasser in eine darunterliegende Betonwanne. Die Sohle dieser Wanne ist quer zur Kanalaxe stark geneigt. Am unteren Ende befindet sich eine Spülöffnung, welche mit einer Regalier- und einer Revisionsschütze geschlossen werden kann. Ein anschliessender begehbarer Kanal führt das sandhaltige Spülwasser unmittelbar oberhalb der Zentrale in den Rhein zurück.

4. Bauliche Anlagen des Maschinenhauses

Um den sehr tiefen und entsprechend teuren Unterwasserkanal möglichst kurz zu halten, wurde das Maschinenhaus soweit nach unten geschoben, als es die durch den Rhein und die Nationalstrasse beschränkten Platzverhältnisse erlaubten. Ausser den für die zwei Maschinengruppen notwendigen Räumlichkeiten und Einrichtungen wurden in der Zentrale und im Unterwasserkanal Vorkehrungen für einen späteren direkten Anschluss eines Unterliegerwerkes getroffen. Dazu gehören u. a. zwei beidseits angeordnete Umläufe für je $60 \text{ m}^3/\text{s}$, welche jederzeit die ununterbrochene Weiterleitung des Betriebswassers an den Unterlieger gewährleisten werden. Diese sind im Oberwasser gleich ausgebildet wie eine Hälfte der zweiteiligen Turbineneinläufe; unterwasserseitig münden sie seitlich in den Unterwasserkanal ein, der als Tosbecken bei der Energievernichtung wirken wird. Um ein einwandfreies Funktionieren zu gewährleisten, wurden Versuche an einem Modell im Massstab 1:40 durchgeführt.

Die Bilder 14 bis 17 zeigen das Maschinenhaus. Von den vielen interessanten Problemen, die hier gelöst werden mussten, soll nur auf das Folgende hingewiesen werden: Weil das monolithisch aus Stahlbeton konstruierte Gebäude auf einer Alluvion fundiert werden musste, führt der wegen der Stauspiegelschwankungen variable Überdruck des Oberwassers zu verhältnismässig grossen Neigungen der ursprünglichen Maschinenaxe. Vorschriften der Turbinen- und Traglager-Lieferanten in bezug auf die zulässige Grösse dieser Bewegungen zwangen den Projektverfasser, das Gebäudefundament oberwasserseitig rund 3 m über die Pfeilerkörper vorzuziehen.

5. Elektromechanischer Teil des Maschinenhauses

Der Rechen vor den Turbineneinläufen besteht aus Profilstäben mit oberwasserseitigem Wulst (von Roll Nr. 922 80/12/8 m), die in einem lichten Abstand von 60 mm angeordnet sind. In der Rechenebene beträgt die grösste Wassergeschwindigkeit $0,85 \text{ m/s}$. Die Rechenreinigungsmaschine ist so konstruiert, dass sie auch als Dammbalkenversetzkrane verwendet werden kann.

Ein Satz Dammbalken dient als provisorischer Abschluss für die zwei Einläufe einer Turbine von je 4,0 m lichter Weite. Die einzelnen Elemente sind rahmenförmig ausgebildet. Wenn die Dammbalken eingesetzt sind, bleibt ein freier Raum von etwa 1 m zwischen dem Rechen und der $18,3$ m hohen Dammbalkenwand. Die Dammbalken laufen auf Rollen und können noch bei einem Wasserdurchfluss von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ eingesetzt werden. Mit dieser Wassermenge muss dann gerechnet werden, wenn sich ein Fremdkörper im Leitrad einer Turbine verklemt hat und der entsprechende Scherbolzen abgesichert ist, während sich das übrige Leitrad geschlossen hat. Deponiert werden die Dammbalkenelemente in Taschen, welche hinter der Stauwand liegen.

Das für die Geschwemmseleinne benötigte Spülwasser von rund 200 l/s wird mit einer horizontalaxigen Schraubenpumpe gefördert, welche in einem Raum der Zentrale auf Kote 573,00 untergebracht ist. Dieser Pumpe sind zwei oberwasserseitige Wasserfassungen beigeordnet.

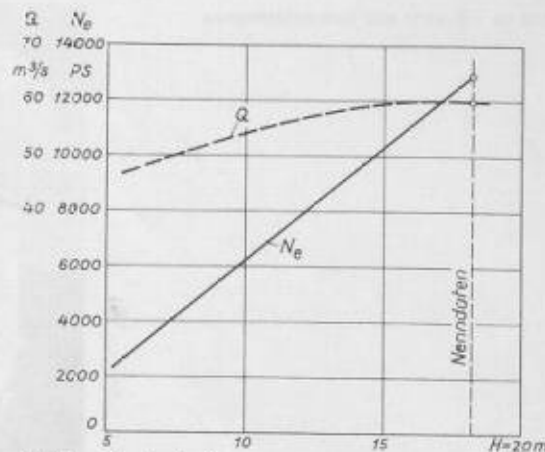


Bild 18. Maximale Wassermengen und Wellenleistungen einer Kaplan turbine in Abhängigkeit der Nettofallhöhe

Von einer Brücke auf Kote 572,20 aus werden die Unterwasserdammbalken bedient. Zwei mal zwei Elemente schliessen den zweiteiligen Auslauf einer Turbine. Ihr Depot befindet sich unter der Bedienungsbrücke. Versetzt werden die Dammbalken mit einem Zangenbalken und einem Elektrohobwerk, das auf einem Hängebahnträger läuft.

Die Anordnung der zwei Maschinengruppen in der Zentrale geht aus den Bildern 16 und 17 hervor. Im Interesse einer guten Zugänglichkeit wurden die Spurlager mit den Tragsternen auf den Stator der Generatoren angeordnet. Diese hat man soweit in den Maschinensaalboden versenkt, dass nur die Erregeraufbauten mit den Regulierölzuführungen in den Maschinensaal hineinragen.

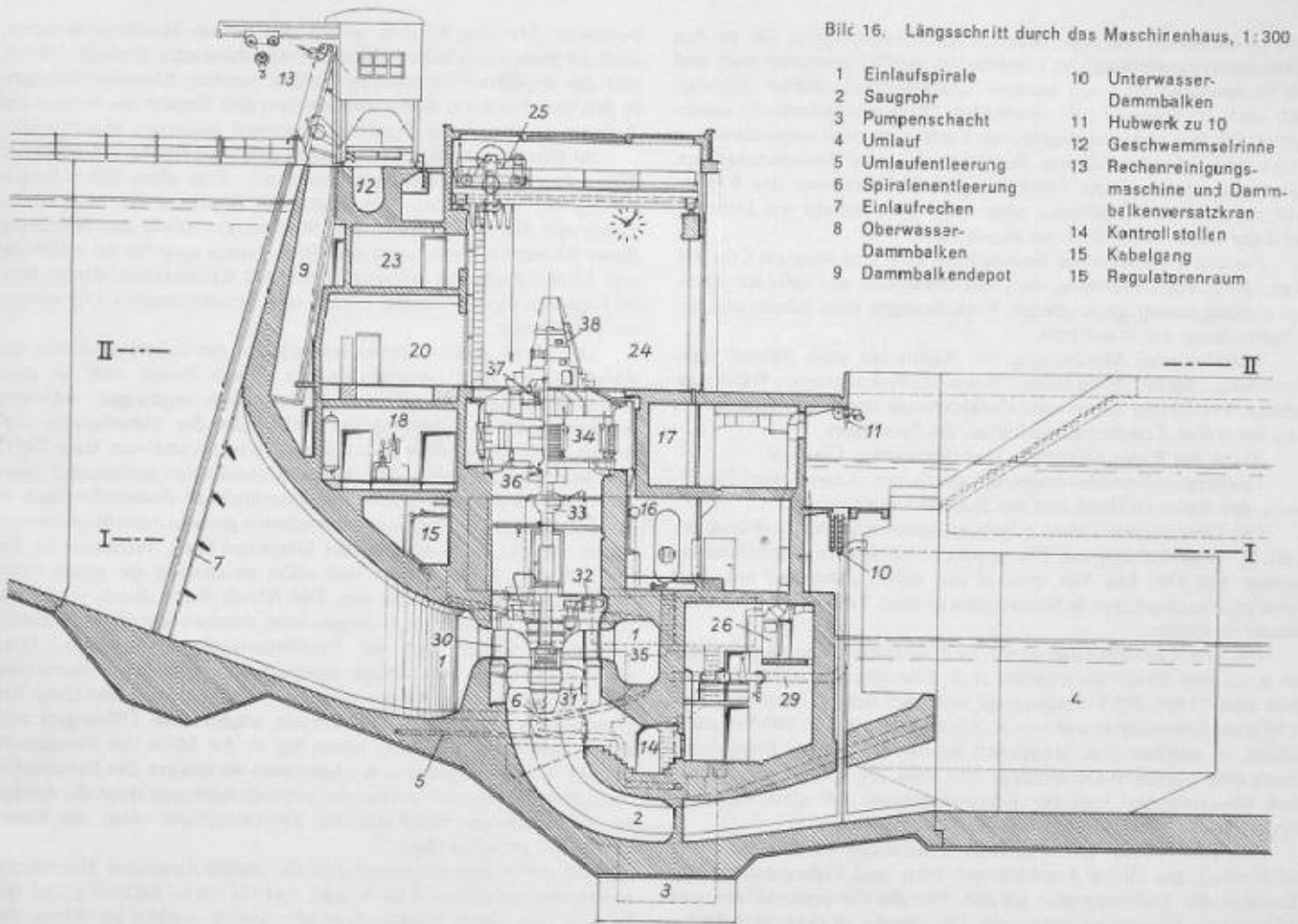
Die Kaplan turbine sind für folgende Nennwerten gebaut: Gefälle 18,2 m, Wassermenge $60 \text{ m}^3/\text{s}$, Drehzahl 187,5 U/min, Leistung 12950 PS, Laufraddurchmesser 3,15 m, Schaufelzahl 5. Bild 18 gibt die Wassermengen und die Wellenleistungen bei voller Öffnung einer Kaplan turbine in Abhängigkeit von der Nettofallhöhe. Die Turbinen sind von normaler Bauart. Wegen des zeitweise stark sandhaltigen Betriebswassers und des grossen Gefalles musste mit einer starken Abnutzung der Laufräder gerechnet werden. Um diese bei Inspektionen und normalen Reparaturen nicht ausbauen zu müssen, sind die aus rostfreiem Stahlguss hergestellten Laufradmäntel im Bereich der ebenfalls rostfreien Laufradschaufeln demontierbar. Damit sind die Laufräder nicht nur von unterwasserseitigen Montagepodesten aus zugänglich, sondern auch von Inspektionsgängen, die hinter den Mänteln verlaufen. In der Spirale sind an zwei Stellen Druckabnahmerohre für die laufende Wassermengenmessung nach dem Differenzdruckverfahren eingebaut.

Zur Abdichtung der Turbinenwelle dienen axial wirkende, federbelastete Kohlenringe, die in der Mitte mit aufbereitetem Sperrwasser beschickt werden. In die Wellenabdichtung ist ein Montagerring eingebaut, der das Auswechseln der Kohlenringe ohne Entleeren der Einlaufspirale ermöglicht. Drei Führungslager halten die dreiteilige Welle der Gruppe; das oberste ist mit dem Spurlager kombiniert. Sämtliche Schmierstellen der Turbinen sind an eine gemeinsame Zentralschmieranlage angeschlossen. Die mit einem elektronischen Regler ausgerüstete Turbinenregelung arbeitet mit Drucköl von 30 atü. Die Ölpumpe wird von der Turbinenwelle angetrieben. Eine Reservepumpe mit elektrischem Antrieb springt im Störfalle automatisch ein. Beim Durchbrennen der Gruppe wird eine weitere Durchbrennpumpe eingeschaltet, die das Laufrad mit 60 atü Öldruck schliesst. Eine Spezialsteuerung sorgt in diesem Falle dafür, dass die Durchbrenndrehzahl nicht grösser wird als 140% der Normaldrehzahl.

Die beiden Dreiphasen-Synchron-Generatoren haben je eine Nennleistung von 14000 kVA bei $\cos \varphi = 0,7$ übererregt. Die Nennspannung beträgt 11000 V, die Durchbrenndrehzahl 500 U/min und die maximale Belastung des Spurlagers 210 t. Da die Maschinen ohne Zwischenschaltung von Transformatoren über Kabel direkt mit der 11-kV-Freileitung von der Zentrale zu den Emser Werken verbunden sind, musste dem Schutz gegen atmosphärische Überspannungen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Am letzten Freileitungsmast, am Kabelabspannmast und vor den Generatoren sind Überspannungsableiter vorhanden, deren Einstellung derart aufeinander abgestimmt ist, dass die zwei erstgenannten den Grobschutz und die letztgenannten den Feinschutz übernehmen.

Bild 16. Längsschnitt durch das Maschinenhaus, 1:300



- | | |
|--------------------------|--|
| 1 Einlaufspirale | 10 Unterwasser-Damm balken |
| 2 Saugrohr | 11 Hubwerk zu 10 |
| 3 Pumpenschacht | 12 Geschwemmleirinne |
| 4 Umlauf | 13 Rechenreinigungsmaschine und Damm balkenversatzkran |
| 5 Umlaufentleerung | 14 Kontrollstollen |
| 6 Spiralenentleerung | 15 Kabelgang |
| 7 Einlaufrechen | 16 Regulatorraum |
| 8 Oberwasser-Damm balken | |
| 9 Damm balken depot | |

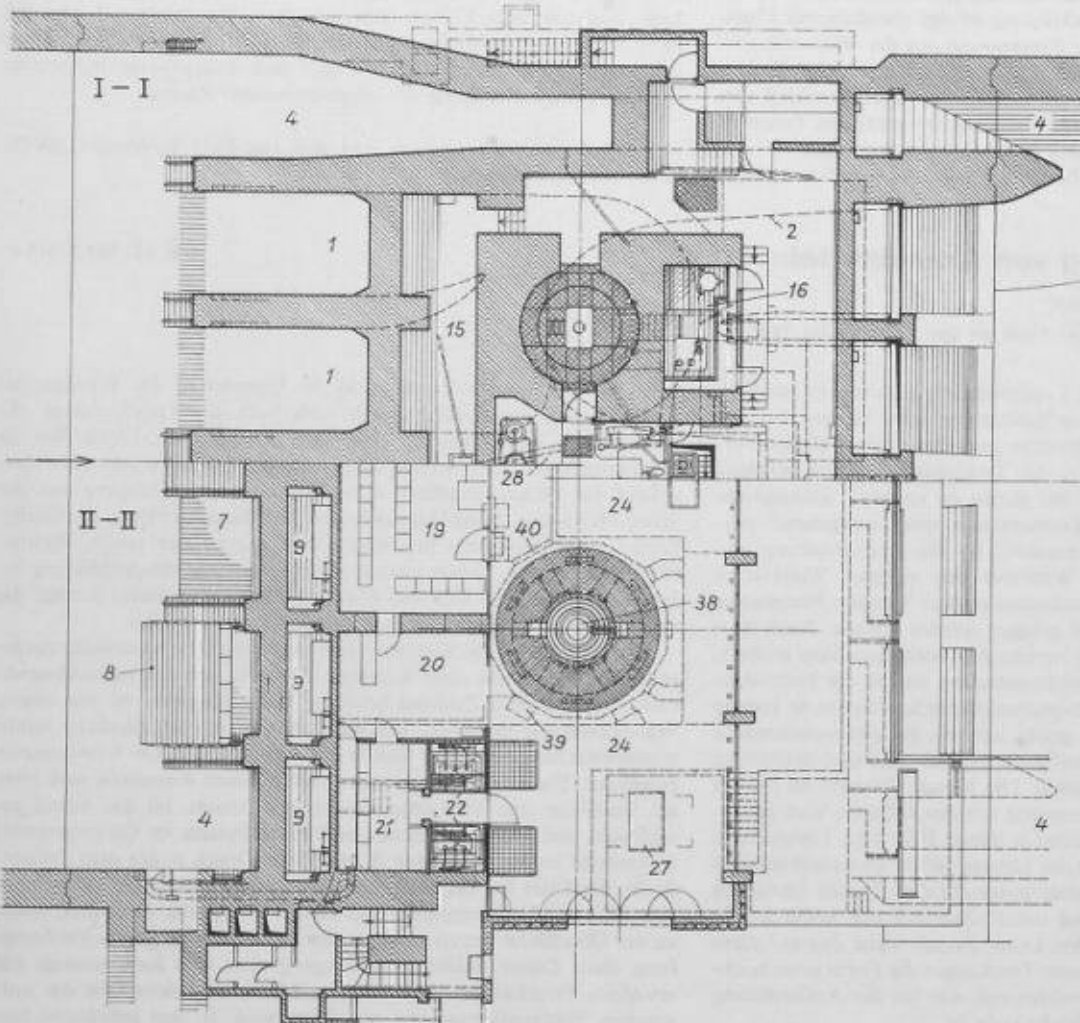


Bild 17. Horizontalschnitte I-I (oben) und II-II (unten) durch das Maschinenhaus, 1:300

- | |
|--|
| 17 Raum für Ventilationsanlage |
| 18 Raum für Druckluft-erzeugung |
| 19 Kommandoraum |
| 20 Relaisraum |
| 21 Niederspannungs-Verteilung |
| 22 Eigenbedarf-Transformatoren |
| 23 Büro |
| 24 Maschinensaal |
| 25 Maschinensaal kran |
| 26 Ventilation für die Kellerräume |
| 27 Montageöffnung für Umlaufschütze |
| 28 Kühlwasseraufbereitung |
| 29 Entleerungsleitung zu 3 |
| 30 Turbinenleitrad |
| 31 Turbinenauftrad |
| 32 Leitrad-Servomotor |
| 33 Lauftrad-Servomotor |
| 34 Generator |
| 35 Turbinenlager |
| 36 Generatorlager |
| 37 Spur- und oberes Führungslager |
| 38 Erregeraufbau |
| 39 Entregungssch-ank (auf Generatorhöhe) |
| 40 Stromabnahme (auf Generatorhöhe) |

Die Generatoren besitzen zudem Schutzkondensatoren, die zu den Überspannungsableitern des Feinschutzes parallel geschaltet sind, und als Nullpunktschutz einen weiteren Überspannungsableiter. Schliesslich sind die Statorn mit verstärkten Orlitherm-Isolationen ausgerüstet. Die Polräder sind sogenannte Kettenläufer mit eingeschobenen Polen und Dämpferwicklung. Bei Stilllegung einer Maschinengruppe dient eine pneumatische Einrichtung dem Abbremsen des Rotors. Mit der gleichen Vorrichtung, aber unter Verwendung von Drucköl, wird der Rotor bei Revisionen angehoben.

Für den automatischen Brandschutz sorgt eine normale CO₂-Anlage, deren Handauslösung vom Maschinensaal aus erfolgen kann. Im übrigen dienen die folgenden Vorkehrungen dem Schutz und der Überwachung der Maschinen:

Automatische Abschaltung mit Alarm bei max. Strom, max. Spannung, Stator Erdschluss, Stator Differenzstrom, Windungschluss, Erreichung der zweiten Gefahrenstufe der Lagerthermostaten und bei steilen Temperaturgradienten des Spurlagers.

Alarm bei Rotor Erdschluss und thermischer Überlast.

Temperatur-Fernüberwachung sämtlicher Lager, der Stator-eisen, der Statorwicklung und der Statorluft (kalt/warm).

Die Generatoren weisen Eigenventilation und Rückkühlung der Luft in Wasserkühlern auf. Die grösste abzuführende Verlustleistung beträgt 340 kW. Ein Teil wird in der kalten Jahreszeit mit einer Ventilationsanlage zum Beheizen eines grossen Teiles des Maschinenhauses verwendet.

Die 11-kV-Schaltanlage ist mit zwei Sammelschienen ausgerüstet, die je an zwei Stellen auftrennbar sind. Eine Eigenbedarfsanlage umfasst eine 11000/380-V-Trafoanlage mit zwei separat und natürlich belüfteten Transformatoren von je 500 kVA sowie eine 380-V-Verteilanlage, in welcher alles vorgekehrt ist für die spätere Einspeisung durch eine Notstrom-Dieselanlage von etwa 250 kVA. Direkt neben dem Maschinensaal liegt der Kommandoraum mit allen wichtigen Steuerungs-, Überwachungs- und Messeinrichtungen.

Mit dem Wasser aus einer Kühlwasseranlage werden die Generatorluft, das Öl der kombinierten Trag- und Führungslager und dasjenige der Turbinenregler gekühlt. Für die Generatorkühler wird aufbereitetes Flusswasser verwendet. Die übrigen zu kühlenden Stellen haben Umlaufkühlung; die Rückkühlung erfolgt ebenfalls mit Flusswasser. Als Reserven stehen eine Einspeisung aus der Wasserversorgung der Emser Werke sowie ein Reservoir mit einem Inhalt von 10 m³ zur Verfügung. Zwei Bohrlochpumpen mit einer Leistung von je 200 l/s bei 14 m Gegendruck fördern das im zentralen Pumpenschacht zusammenfliessende Wasser in den Unterwasserkanal.

Der Maschinensalkran ist für eine grösste Tragkraft von 50 t

bemessen. Mit ihm können, ausser den beiden Maschinengruppen, auch die beiden möglicherweise später einzubauenden Umlaufschützen und die Entwässerungspumpen bedient werden. Montageöffnungen in den verschiedenen Böden ermöglichen den Einsatz des Kranes bei Arbeiten in allen unter dem Maschinensaal gelegenen Stockwerken.

Im Maschinenhaus sind insgesamt drei voneinander unabhängige Klima- bzw. Ventilationsanlagen eingebaut. Eine dient der Klimatisierung des Bürotraktes, eine zweite der Belüftung des Maschinen-saales und des darunterliegenden Stockwerkes sowie der Beheizung dieser Räume im Winter, und eine dritte Anlage sorgt für die Belüftung und Entfeuchtung der unterwasserseitigen Kellerräume, damit diese als Lager für das notwendige Ersatz- und Revisionsmaterial verwendet werden können.

Die zweite Anlage verwendet während der kalten Jahreszeit die Abwärme der zwei Generatoren. Zu diesem Zweck wird an zwei Stellen Warmluft aus den Generatorgruben angesogen, während gleichzeitig die Kühlleistung der Luftkühler der Generatoren verringert wird. Diese Warmluft mit einer Temperatur von etwa 30 °C wird in einen Kanal unter dem Maschinensaalboden geführt und steigt dann durch hinter der Glasfassade ausströmende Bodenöffnungen in den Maschinensaal. Dank der vorgesehenen grossen Austrittsgeschwindigkeit streicht die Luft längs der Glaswand hoch, verhindert so die Bildung von Schwitzwasser und wälzt gleichzeitig die ganze Luftmasse des Maschinensaales um. Die Abluft fliesst durch vergitterte Bodenöffnungen ins erste Untergeschoss, durchströmt dieses und wird schliesslich wieder von der Ventilationsanlage angesogen. Dort wird sie in einer Filteranlage gereinigt und dann den Generatoren auf der unteren Seite wieder zugeführt. Die untere Abdeckung der Generatoren weist sechs symmetrisch angeordnete Öffnungen auf, durch welche die Luft von unten her in die Mitte des Generators gelangt. Ein Blindboden aus Aluminium verhindert das Entweichen der Luft nach unten. Während der warmen Jahreszeit dient die Anlage ausschliesslich der Belüftung der Zentralräume ohne die Generatorluft einzubeziehen.

Da der Kommandoraum und die darüberliegenden Büroräume sogenannte gefangene Räume sind, war für deren Belüftung und Beheizung eine eigene Klimaanlage erforderlich, welche im Winter die Luft teils aus dem Freien, teils aus dem Maschinensaal ansaugt, filtert, erwärmt, befeuchtet und nach dem Durchströmen der Räume in den Maschinensaal zurückgibt. Auch diese Anlage sorgt im Sommer lediglich für die Belüftung der angeschlossenen Räume.

Adresse des Verfassers: J. Lem, dipl. Ing. ETH, Svoldergt. 2, Skillebekk., Oslo, Norwegen.

Die Gefriertrocknung von Arzneimitteln

Von Paul Stricker, dipl. Ing., Basel

Vortrag, gehalten am 13. Oktober 1965 an der Kältetagung 1965 in Basel

Die Gefriertrocknung, auch Lyophilisation genannt, ist ein Verfahren, durch das eine eingefrorene Substanz bei tiefer Temperatur und verringertem Druck durch Sublimation getrocknet wird. Dieses Verfahren stellt die schonendste Art der Trocknung dar und schliesst dank der tiefen Temperaturen, bei denen es vorgeht, schädigende Einwirkungen wie Oxydation, Fermentation usw. weitgehend aus. Es wird seit Beginn dieses Jahrhunderts für die Konservierung von Mikroorganismen angewandt. Während des zweiten Weltkrieges wurde es mit Erfolg für die Trocknung grosser Mengen Blutplasma eingesetzt, welches dadurch auch gelagert werden konnte. Nach dem Kriege hat die Gefriertrocknung weitere Anwendungsgebiete erobert, unter anderem solche in der pharmazeutischen und in der Nahrungsmittel-Industrie. In der chemisch-pharmazeutischen Industrie konnte dadurch ein wichtiges Problem gelöst werden. Es gibt verschiedene Produkte, die im gelösten Zustand nicht haltbar sind und deshalb in fester Form geliefert werden müssen. Die Menge Feststoff ist hierbei meistens so gering, dass eine Dosierung mit den üblichen Vorrichtungen nicht möglich ist. Daher werden in diesen Fällen die Feststoffe in Wasser gelöst, die Ampullen mit der Lösung gefüllt und anschliessend durch Gefriertrocknung das Wasser ausgeschieden. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass die Lösung unmittelbar vor der Abfüllung in die Ampullen sterilfiltriert werden kann. Ferner weist das auf diese Weise erhaltene, genau zugemessene Trockengut die Form eines hochporösen, sehr wassergierigen Gebildes auf, was bei der Aufbereitung für den Gebrauch von grosser Wichtigkeit ist.

Das Verfahren stützt sich auf die Eigenschaft des Wassers, bei welchem auch in Festform, d. h. unterhalb des Tripelpunktes, ein Dampfdruck vorhanden ist. Dies wird in Bild 1 ersichtlich, wo die Spannungskurve von Wasser dargestellt ist. Daraus ergibt sich, dass sobald der Druck unterhalb 4,58 Torr liegt, ein Übergang aus der festen Phase, d. h. ohne Durchschreiten der flüssigen Phase, stattfindet. Dieser als Sublimation bekannte Übergang ist mit einem Wärmebedarf verbunden, dessen Grösse temperatur- und druckabhängig ist. Im Bereich, in dem sich die Gefriertrocknung abspielt, beträgt die Sublimationswärme rd. 700 kcal/kg verdampftes Wasser.

In Bild 2 ist ein Gefriertrocknungsapparat schematisch dargestellt. Er besteht aus einer Kammer A, worin sich das zu trocknende Gut in gefrorenem Zustand befindet. Diese Kammer ist von einem Wärmereservoir umgeben, welches dem Gut die erforderliche Sublimationswärme abgibt. Im Teil B des Apparates ist ein Kondensator eingebaut. Die beiden miteinander verbundenen Kammern sind über ein Ventil an eine Vakuumpumpe angeschlossen. Ist das Ventil geschlossen und befindet sich das evakuierte System im Gleichgewicht, so herrscht in den Kammern A und B ein Druck p , der dem Dampfdruck des Eises bei der jeweiligen Temperatur entspricht. Wird aber mit Hilfe der Vakuumpumpe der Druck im System verringert, findet an der Oberfläche des zu trocknenden Gutes eine langsame Verdampfung statt. Dieser Sublimationsvorgang setzt sich fort, solange der erwähnte Druckunterschied erhalten bleibt, und dem Gut die notwendige Sublimationswärme zugeführt wird. In den gebräuchlichen

DK 621.565.5:615.41